

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Abordagem híbrida de otimização/simulação para a gestão de cadeias de abastecimento flexíveis

Narciso Manuel Sobral Couto Caldas

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Jorge Manuel Pinho de Sousa

Co-orientador: Samuel de Oliveira Moniz

24 de Julho de 2018

Resumo

Nos dias de hoje, para serem competitivas, as empresas têm de estar constantemente a inovar. Ter uma cadeia de abastecimento eficiente e bem gerida é muito importante para atingir esse propósito. No caso da indústria das peças e componentes de reposição, a gestão da cadeia é uma tarefa de grande complexidade, pois certas empresas podem chegar a produzir componentes para produtos que se encontram no mercado há mais de uma década. Por estas e outras razões, gerir a cadeia de abastecimento e o inventário são atividades fundamentais, com fortes implicações nos custos e no *lead time*.

Neste contexto, o *additive manufacturing* tem vindo a evoluir nos últimos anos, com cada vez maiores investimento em termos de desenvolvimento e aplicações. Neste tipo de indústria, a sua utilização, e mais propriamente a tecnologia de impressão 3D, pode trazer benefícios significativos. A impressão 3D permite, de facto, produzir peças com elevado nível de customização sem a necessidade de *set-ups* significativos, e com uma redução de custos, de níveis de inventário e/ou *lead time*.

A aplicação desta tecnologia cria inúmeros desafios, obrigando à reformulação e mudança de configuração das cadeias tradicionais, com a produção de certos tipos de peças por impressão 3D a ser aplicada mais a jusante na cadeia.

Esta dissertação propõe e testa um modelo híbrido de otimização/simulação para abordar o uso da tecnologia de impressão 3D numa cadeia de abastecimento de uma empresa de produção e manutenção de elevadores. Neste modelo, é usada a ferramenta de simulação Simio, sendo estudadas novas configurações para a cadeia, e avaliados os benefícios obtidos por essas novas configurações.

Abstract

Nowadays, to be competitive, companies must constantly innovate. Having an efficient and well-managed supply chain is very important to achieve this purpose. In the case of the spare parts industry, supply chain management is a very complex task, as certain companies can produce components for products that have been on the market for more than a decade. For these and more reasons, supply chain and inventory management are key activities with high implications for costs and lead time.

Additive manufacturing has been evolving in recent years, with increasing investment in terms of development and applications. In this industry, more properly 3D printing technology can bring significant benefits. 3D printing allows you to produce parts with a high level of customization without the need for setups. Also, helps with a reduction in costs, inventory levels and/or lead time.

The application of this technology creates numerous challenges, forcing the reformulation and change of the configuration of the traditional chains, with the production of certain types of pieces by 3D printing to be applied more downstream in the chain.

This dissertation proposes and tests a hybrid optimization/simulation model to address the use of 3D printing technology in a supply chain of an elevator production and maintenance company. In this model, the Simio simulation tool is used, new configurations for the chain are studied, and the benefits obtained by these new configurations are evaluated.

Agradecimentos

Primeiro gostava de agradecer aos meus orientadores, Jorge Pinho de Sousa e Samuel Moniz, pela oportunidade de realizar esta dissertação e pela ajuda prestada ao longo da sua realização.

Ao INESC TEC pela oportunidade de realizar a dissertação na instituição.

Ao João Basto e ao Ruben Dias pelo apoio e ajuda prestados na aprendizagem das ferramentas utilizadas e na realização da dissertação.

Por último à minha família e amigos por todo o apoio e motivação que me deram ao longo deste tempo todo, porque foi graças a eles que escolhi este caminho e estou aqui hoje.

Narciso Manuel Sobral Couto Caldas

*“Try not to become a man of success.
Rather become a man of value.”*

Albert Einstein

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Metodologia	4
1.5	Estrutura da Dissertação	4
2	Revisão bibliográfica	7
2.1	Cadeias de abastecimento	7
2.1.1	Gestão de cadeias de abastecimento	8
2.1.2	Logística de cadeias de abastecimento	9
2.2	Gestão de stocks	12
2.2.1	Métodos de revisão de stock	12
2.3	<i>Additive manufacturing</i>	15
2.4	Simulação	16
2.4.1	Vantagens e Desvantagens da simulação	16
2.4.2	Tipos de abordagens	17
2.4.3	<i>System Dynamics</i>	18
2.4.4	Modelação Baseada em Agentes	18
2.4.5	Simulação de Eventos Discretos	18
3	Abordagem metodológica	21
3.1	Caso de estudo	21
3.1.1	Fornecedores Externos	22
3.1.2	Estações Remotas	22
3.1.3	Clientes finais	23
3.1.4	Cadeia de abastecimento em estudo	23
3.2	Metodologia	24
3.3	Modelos	25
3.3.1	Modelo de otimização	25
3.3.2	Modelo de simulação	29
4	Resultados	39
4.1	Cenário 1: Uso de impressão 3D atual na primeira configuração	39
4.1.1	Resultados da otimização	40
4.1.2	Resultados da simulação	41
4.1.3	Análise dos resultados	43
4.2	Cenário 2: Uso de impressão 3D do futuro na primeira configuração	45

4.2.1	Resultados da otimização	45
4.2.2	Resultados da simulação	46
4.2.3	Análise dos resultados	47
4.3	Cenário 3: Uso de impressão 3D atual na segunda configuração	49
4.3.1	Resultados da otimização	49
4.3.2	Resultados da simulação	50
4.3.3	Análise dos resultados	51
4.4	Cenário 4: Uso de impressão 3D do futuro na segunda configuração	52
4.4.1	Resultados da otimização	52
4.4.2	Resultados da simulação	53
4.4.3	Análise de resultados	54
5	Conclusões e trabalhos futuros	57
5.1	Conclusões	57
5.2	Trabalhos futuros	58
	Referências	59

Lista de Figuras

1.1	Cadeia de abastecimento genérica [1]	2
2.1	Cadeia de abastecimento global [1]	8
2.2	Problemas de produtividade [2]	13
2.3	Método de revisão contínuo [3]	13
2.4	Método de revisão contínuo com stock de segurança [3]	14
2.5	Método de revisão periódico [3]	14
2.6	Impressão 3D [4]	15
2.7	Modelo Único [5]	17
2.8	Múltiplos modelos [5]	18
2.9	Metodologia usada em [6]	19
3.1	Cadeia de abastecimento atual	22
3.2	Cadeia de abastecimento em estudo	23
3.3	Metodologia utilizada	24
3.4	Tipos de entidades criados	30
3.5	Representação dos clientes	31
3.6	Representação das estações remotas e fornecedores externos	31
3.7	Processo de revisão periódica de stock	32
3.8	Ligações na simulação	33
3.9	Dashboard custos	36
3.10	Primeira configuração da cadeia de abastecimento	37
3.11	Segunda configuração da cadeia de abastecimento	37
4.1	Distribuição de custos do primeiro cenário	43
4.2	Inventário da peça B na estação A	43
4.3	Inventário da peça C na estação B	44
4.4	Utilização da impressora 3D (em horas) no cenário 1	44
4.5	Distribuição de custos do segundo cenário	47
4.6	Inventário da peça C na estação C	48
4.7	Utilização da impressora 3D (em horas) no cenário 2	48
4.8	Estado do inventário da peça C na estação C	51
4.9	Utilização da impressora 3D (em horas) no cenário 3	52
4.10	Utilização da impressora 3D (em horas) no cenário 4	55

Lista de Tabelas

3.1	Variáveis de estado das ordens	30
3.2	Resultados não vinculados	34
3.3	Resultados vinculados	35
4.1	Configuração de fornecimento de peças	41
4.2	Custos obtidos pela otimização	41
4.3	<i>Lead time</i> médio dos clientes	42
4.4	Nível de serviço total	42
4.5	Número de ruturas de stock	42
4.6	Níveis de serviço individuais e estado do inventário médio	42
4.7	Custos obtidos pela simulação	42
4.8	Custos totais da cadeia de abastecimento	44
4.9	Configuração de fornecimento de peças	45
4.10	Custos obtidos pela otimização	46
4.11	<i>Lead time</i> médio dos clientes	46
4.12	Nível de serviço total	46
4.13	Número de ruturas de stock	46
4.14	Níveis de serviço individuais e estado do inventário médio	47
4.15	Custos obtidos pela simulação	47
4.16	Custos totais da cadeia de abastecimento	48
4.17	Configuração de fornecimento de peças	49
4.18	Custos obtidos pela otimização	49
4.19	<i>Lead time</i> médio dos clientes	50
4.20	Nível de serviço total	50
4.21	Número de ruturas de stock	50
4.22	Níveis de serviço individuais e estado do inventário médio	50
4.23	Custos obtidos pela simulação	51
4.24	Custos totais da cadeia de abastecimento	52
4.25	Configuração de fornecimento de peças	53
4.26	Custos obtidos pela otimização	53
4.27	<i>Lead time</i> médio dos clientes	53
4.28	Nível de serviço total	54
4.29	Número de ruturas de stock	54
4.30	Níveis de serviço individuais e estado do inventário médio	54
4.31	Custos obtidos pela simulação	54
4.32	Custos totais da cadeia de abastecimento	55

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto

Para se conseguir ser competitivo no mercado com produtos complexos, de elevada customização e que têm ciclos de vida reduzidos, as cadeias de abastecimento das empresas precisam de ser flexíveis para se adaptarem às mudanças que ocorrem no mercado [7, 8].

Uma cadeia de abastecimento é descrita por Beamon [9] como “um conjunto de processos interligados, em que várias entidades empresariais trabalham em conjunto para adquirir matéria-prima, trabalhar essa mesma matéria-prima para a transformar num produto final e entregar esse produto final ao retalhista.”

Um bom desenho da cadeia de abastecimento é um fator muito importante na performance que uma empresa irá ter. Este deve ter em conta cada um dos constituintes das cadeia (fornecedores, distribuidores, grossistas, etc.) e deve avaliar cada um segundo um conjunto de parâmetros, de modo a conseguir a melhor utilização destes elementos [1]. Esta tarefa pode ser bastante árdua devido a diversos fatores, tais como, o efeito chicote [10], o transporte entre integrantes da cadeia de abastecimento, a sua escala e complexidade (incrementando mais a dificuldade se esta for global) [1] e ainda a localização de instalações [11]. Na figura 1.1 está representada uma cadeia de abastecimento genérica.

Nos diversos pontos da cadeia de abastecimento é importante ter uma boa gestão de stock, pois permite reduzir custos e responder a variações na procura, entre outros benefícios [12]. Os stocks podem ser classificados em diferentes tipos, tal como por exemplo, produtos finais e matérias-primas [12]. Existem diferentes políticas de gestão de stocks que podem ser utilizadas [3], mas a utilização de cada uma delas depende do tipo de negócio que se está a praticar (*make-to-stock*, *make-to-order*, etc.).

A evolução tecnologia que se vive neste momento veio trazer mudanças para as cadeias de abastecimento. O uso de *additive manufacturing*, uma técnica de produção de objetos tridimensionais através da adição de material, camada a camada [4], veio criar inúmeras oportunidades para a indústria da produção, uma vez que é bastante flexível e permite um elevado grau de customização. Este tipo de tecnologia tem vindo a amadurecer nos últimos anos e a tornar-se cada vez mais

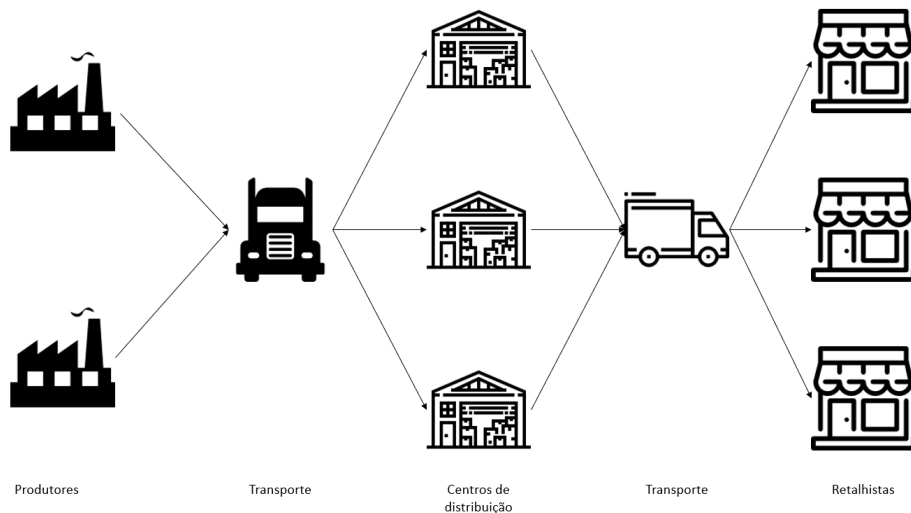


Figura 1.1: Cadeia de abastecimento genérica [1]

viável para ser usada como tecnologia de produção [13], contudo também vem acrescentar inúmeros desafios no desenho das cadeias de abastecimento. Nas cadeias de abastecimento de peças de reposição, o uso de *additive manufacturing*, tem um enorme potencial a ser explorado [8], visto que permite a produção de peças antigas, que não são economicamente viáveis de ter em stock, com custo e tempo de produção reduzidos. Vem permitir também realizar este tipo de operação em pontos da cadeia de abastecimento mais próximos do destinatário do produto fabricado.

1.2 Motivação

Nos dias de hoje, em que a competitividade entre as empresas é bastante elevada, para que as empresas consigam manter a sua parte do mercado e consigam conquistar novos clientes, estas procuram continuamente melhorar não só os seus produtos, mas também os processos logísticos. Um dos focos da melhoria das empresas é precisamente na cadeia de abastecimento. Aqui o objetivo consiste em reduzir o *lead time*, reduzir os custos e aumentar a eficiência e eficácia dos processos.

A gestão de stocks é um dos pontos que se pode melhorar dentro das cadeias de abastecimento. A existência de stock em algum ponto da cadeia, seja ele de segurança ou não, vai ter associado alguns custos. Esses custos são referentes à infraestrutura onde se vai armazenar esse stock e também no que diz respeito à sua manutenção. Uma gestão de stocks otimizada permite não só reduzir custos, mas também ajuda a reduzir o *lead time* [12, 3, 14].

Quando temos o cenário de uma empresa que comercializa produtos com elevado grau de customização, gerir a cadeia de abastecimento e gerir os stocks torna-se uma tarefa ainda mais complicada. No caso de estudo abordado neste trabalho, considera-se uma empresa que fabrica e realiza manutenção de elevadores. Esta apresenta uma elevada gama de modelos no seu catálogo.

Assim, alguns dos modelos em que a manutenção é praticada, podem apresentar mais de uma década de funcionamento. Com o lançamento de novos modelos, certas peças necessárias para realizar a sua manutenção também sofrem modificações, o que provoca que diferentes tipos de modelos de elevadores precisem de diferentes tipos de peças, seja para manutenção preventiva ou curativa. Com isto em mente, para se obter um *lead time* reduzido para qualquer pedido de manutenção de qualquer elevador, seria necessário ter stock para todos os tipos de peças, o que implicaria a existência de um local de armazenamento e consequentemente um custo associado. Por outro lado, se não existirem stocks, tal implica um aumento do *lead time*.

Implementado o uso de *additive manufacturing*, neste caso o uso de tecnologia de impressão 3D, podemos fazer peças com elevado nível de customização. Este tipo de tecnologia tem vindo a evoluir ao longo dos anos a nível industrial e prevê-se que continue a evoluir neste ramo [15]. Aplicando esta tecnologia neste caso podemos reduzir o *lead time*, mantendo os níveis de stock baixos ou mesmo inexistentes para os diferentes tipos de peças.

Ao adicionarmos a este problema o uso de modelos de simulação, podemos analisar possíveis soluções a implementar, mas só o uso de simulação não vai indicar a solução ótima para o problema.

Recorrendo ao uso de modelos que combinam otimização e simulação, é possível encontrar uma solução ótima para a configuração da cadeia de abastecimento e a gestão dos stocks na mesma, e ainda simular esse cenário encontrado para avaliar os seus resultados.

1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é desenvolver um modelo híbrido de otimização/simulação para abordar o uso da tecnologia de impressão 3D numa cadeia de abastecimento de uma empresa de produção e manutenção de elevadores.

Tal como foi referido em cima (secção 1.2), para uma empresa neste ramo da indústria que tem um catálogo extenso de produtos e peças para manutenção, para se obter um *lead time* reduzido, para qualquer pedido de manutenção, seria necessário ter em stock todos os tipos de peças. Isto implicaria um elevado custo, mas por outro lado, a não existência de stocks traria consigo *lead times* acrescidos.

O uso de tecnologia de impressão 3D neste problema vai ser avaliado, de modo a medir os benefícios nos custos e *lead time* da cadeia de abastecimento.

Será construído um modelo de simulação que terá em conta as estações remotas da empresa, que são os pontos da cadeia que respondem aos pedidos por peças. Terá também presente os fornecedores externos, que são fornecedores de peças que não pertencem à empresa. Por último estarão também representados os clientes finais para simular a procura. O modelo de otimização, que vai ser integrado, já se encontra desenvolvido estando implementado em CPLEX.

O modelo de simulação será desenvolvido com recurso à ferramenta de simulação SIMIO, que permite a construção de modelos com elevado nível de detalhe. O Simio também permite receber dados de fontes externas, sendo que esta característica será usada para fazer a interligação

entre os modelos de otimização e simulação. Assim vai ser possível utilizar uma abordagem de otimização/simulação, para simular o comportamento, ao longo do tempo, da configuração da cadeia obtida pelo modelo de otimização e comparar os resultados obtidos pelos dois modelos. Permitirá também, realizar uma análise mais detalhada da cadeia de abastecimento obtida e retirar conclusões.

Após a montagem do simulador da cadeia de abastecimento, a integração com o modelo de otimização e a execução das várias simulações, os resultados obtidos serão analisados e comparados entre eles, para assim avaliar a exequibilidade de configurações alternativas da cadeia, com impressoras 3D instaladas para a produção de peças de reposição, e retirar conclusões.

1.4 Metodologia

Como referido na secção 1.3 o principal objetivo é o desenvolvimento de um modelo um modelo de otimização/simulação. Uma abordagem deste tipo permite usar os pontos fortes destes dois tipos de modelos, tais como a combinação da capacidade dos modelos de otimização de obter a solução ótima, e a capacidade dos modelos de simulação de simular sistemas complexos com variáveis estocásticas, ao longo do tempo.

O caso de estudo em questão é o de uma empresa de produção e manutenção de elevadores que pretende aplicar *additive manufacturing* na sua cadeia de abastecimento, para a produção de peças de reposição. Isto tem implicações e mudanças na configuração da cadeia de abastecimento da empresa. Este caso de estudo é aplicado a uma abordagem otimização/simulação, pois permite analisar com um elevado nível de detalhe estas mudanças e implicações originadas.

O modelo de otimização é utilizado para, com os parâmetros de entrada fornecidos, obter a melhor configuração da cadeia de abastecimento possível para esses parâmetros. Os parâmetros de saída deste, tais como, a configuração da cadeia, o número de impressoras a instalar, níveis de inventário, entre outros, são passados como parâmetros de entrada para a simulação. Os resultados obtidos pelo modelo de simulação serão depois analisados.

O caso de estudo e a metodologia aplicada estão explicados em mais detalhe no capítulo 3.

1.5 Estrutura da Dissertação

A estrutura da dissertação das secções seguintes segue a seguinte estrutura:

- Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica, onde é apresentada uma revisão bibliográfica dos temas principais desta dissertação.
- Capítulo 3 - Abordagem Metodológica. Aqui são apresentados os métodos utilizados para a resolução do problema e os modelos utilizados e desenvolvidos.
- Capítulo 4 - Avaliação dos Resultados, onde são avaliados os resultados obtidos pela solução desenvolvida.

- Capítulo 5 - Conclusão. Aqui são apresentadas as conclusões retiradas do trabalho realizado e ainda propostos possíveis trabalhos futuros neste tema.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Neste capítulo vai ser abordada a bibliográfica realizada para esta dissertação. Os temas aqui tratados são: cadeias de abastecimento, gestão de stocks, *additive manufacturing* e simulação. O foco do primeiro tema (cadeias de abastecimento) vai ser a gestão e a logística, incidindo na importância destes, pesquisas na área e métodos de os otimizar. O segundo tema (gestão de stocks), vai focar-se na sua importância e nos vários métodos e políticas. No terceiro tema (*additive manufacturing*) vai ser apresentado o seu conceito, os seus pontos fortes e vários estudos sobre a sua aplicação na indústria. O último tema (simulação) vai apresentar as suas características, vantagens e desvantagens, abordagens e tipos de modelos, focando-se na simulação de eventos discretos.

2.1 Cadeias de abastecimento

A cadeia de abastecimento é uma das partes mais importantes das empresas que se encontram no ramo da indústria da produção. O conceito de cadeia de abastecimento surgiu de várias mudanças observadas na indústria. Entre essas mudanças encontram-se a redução do ciclo de vida dos produtos, o aumento dos custos de produção e a globalização dos mercados [9]. Tal como referido anteriormente no capítulo 1, Beamon descreve [9] as cadeias de abastecimento como processos interligados, onde empresas trabalham para realizar as várias atividades para entregar um produto final ao cliente. Garcia e You [1] definem as cadeias de abastecimento como uma rede de instalações e transportes integrados, com o propósito de fornecer, produzir, armazenar e distribuir produtos e materiais, com complexidade, tamanho e escala diferentes.

Estas podem ter na sua constituição fábricas, centros de distribuição, lojas, armazéns, transporte com diversos veículos, entre outros. A escala e a complexidade da cadeia podem aumentar consideravelmente quando se trata de cadeia globais, como a presente na figura 2.1 [1].

Os processos das cadeias de abastecimento foram, durante vários anos, estudados de forma individual. Este deixou de ser o caso, pois começou a aumentar a atenção dada ao estudo do desenho, desempenho e análise das cadeias como um todo. Esta atenção também virou-se para a inclusão de logística inversa nas cadeias de abastecimento [9].

Tradicionalmente as cadeias são do tipo *forward*, isto é, os produtos são levados desde os fornecedores até aos clientes finais. Estas também podem ser do tipo inversa, que são cadeias onde os produtos retornam dos clientes, como é o caso de reciclagem de produtos mais antigos. Existem cadeias que adotam os dois tipos, podendo ser chamadas de *closed-loop supply chain*, tornando-se estas mais complexas de gerir [16]. Existem várias razões que podem levar à integração do tipo inversa nas cadeias. Entre elas temos necessidade de cumprir legislações ambientais, poder ser atrativa economicamente e a preocupação ambiental [17].

A seguir vão ser tratadas áreas das cadeias de abastecimento, sendo elas: a gestão, a logística e o desenho.



Figura 2.1: Cadeia de abastecimento global [1]

2.1.1 Gestão de cadeias de abastecimento

Para uma empresa ter um melhor entendimento do mercado e uma maior satisfação dos clientes, é necessário um bom desempenho da sua cadeia de abastecimento. Ter uma cadeia que permite responder com *lead time* reduzido aos pedidos dos clientes e adaptar-se às variações da procura, é essencial para o sucesso e sobrevivência da empresa. Isto advém do aumento da competitividade do mercado a nível global e da constante busca em reduzir custos e inventário. Por estas razões é necessário ter uma boa cadeia de abastecimento [18]. As características que separam uma boa cadeia do resto são a eficiência em converter inputs em outputs, melhorar a utilização dos seus ativos e ainda proporcionar respostas de elevada qualidade aos clientes [8]. Para qualquer empresa que quer cumprir estas metas, a gestão de cadeias de abastecimento tornou-se uma questão estratégica essencial [19].

A gestão de cadeias de abastecimentos é o processo de planejar, implementar e controlar, de forma eficiente, as operações da cadeia. Abrange todos os movimentos e armazenamentos de matéria prima, produtos em processamento e produtos acabados desde a origem até ao seu consumo.

Uma parte dos processos de planeamento tem como objetivo encontrar a melhor configuração da cadeia. Além disto, também são consideradas as áreas da produção, do inventário, da distribuição e do roteamento [11]. Em [11, 20], os autores referem que esta assenta em três níveis de decisão: estratégico, tático e operacional. Em [20] abordam que o primeiro nível diz respeito às decisões estratégicas, que tem como objetivo o desenho da cadeia de abastecimento, ou seja, determinar o seu tamanho, a sua localização e o número ideal de parceiros. Como segundo nível temos as decisões táticas. As decisões aqui tomadas são relativas ao planeamento de fornecimentos, mais propriamente à otimização do fluxo. Como último e terceiro nível temos as decisões operacionais, relativas ao planeamento a curto prazo. Melo et al. [11] salientam a importância do nível estratégico, pois as decisões tomadas são decisões de longo prazo, pois é esperado que as instalações operem por um período extenso de tempo.

Uma revisão de literatura existente em gestão de cadeias de abastecimento foi realizada em [11]. Os autores repararam que existe pouca pesquisa sobre o uso de parâmetros estocásticos neste tema.

Seuring e Müller [21] também fizeram uma revisão de literatura sobre gestão de cadeias de abastecimento e propuseram um *framework* conceptual para resumir a pesquisa realizada. O estudo analisou os problemas que surgem no campo da gestão de cadeias de abastecimento sustentáveis. Geralmente, clientes, agências governamentais e acionistas, provocam ações externas nas empresas. Na relação destas empresas com os fornecedores foi possível observar diversas barreiras e incentivos que podem dificultar ou favorecer a gestão de cadeias. Baseando-se nisto os autores identificaram duas estratégias a seguir para este tema. A primeira chamada de “*supplier management for risks and performance*” e a segunda de “*supply chain management for sustainable products*”.

Para o ramo da indústria das peças e componentes de reposição, a gestão de cadeias de abastecimento, tenta reduzir os custos das operações realizadas, mas ao mesmo tempo, tenta manter o nível de satisfação em níveis aceitáveis, contudo existem inúmeros desafios para alcançar este objetivo. Um dos maiores desafios é a imprevisibilidade da procura, por exemplo, quando se lança novos produtos no mercado. Como não existem dados para prever possíveis falhas nos produtos, para se conseguir manter a satisfação dos clientes, para os produtos novos e mais antigos, existe a necessidade de manter peças em inventário. Tendo isto em conta a gestão deste tipo de cadeias torna-se uma tarefa árdua [8].

2.1.2 Logística de cadeias de abastecimento

A logística de cadeias de abastecimento é uma área que no futuro passará por vários obstáculos, mas também terá várias oportunidades. Devido ao forte crescimento da indústria, esta deparasse com vários desafios num ambiente cada vez mais complexo e dinâmico [7].

Uma das suas principais decisões é a escolha da melhor localização para as várias instalações da cadeia [22]. Quando tratamos de problemas discretos de localizações de instalações, estes têm um número limitado de localizações candidatas. O problema da *p*-mediana é o mais simples deste tipo. Aqui todas as localizações candidatas são equivalentes em termos de custos de albergarem uma nova instalação. Quando este não é o caso temos problemas do tipo UFLP (*uncapacitated*

facility location problem) e CFLP (*capacitated facility location problem*). Estes modelos têm muitas características em comum, contudo são insuficientes para lidar com todas as configurações. Para combater isto existem propostas de extensões dos modelos que incluem componentes estocásticas [11].

Quando falamos em cadeias em *loop*-fechado, a logística destas cadeias torna-se mais complexa, pois é necessário ter em consideração as localizações onde são realizadas as reparações e onde são desmontados os produtos [16].

Em [7], desenvolveram-se cenários que descrevem possíveis desenvolvimentos da logística a longo prazo de modo a auxiliar o desenvolvimento de estratégias de longo prazo. Estes cenários também podem ajudar a definir estratégias para potenciais desenvolvimento futuros, como também definir a robustez e adequação das atuais estratégias em funcionamento, nestes cenários. Os cenários prováveis de acontecer que foram desenvolvidos tiveram como base projeções com elevada probabilidade de ocorrência. Com a pesquisa realizada os autores analisaram possíveis eventos e desenvolvimentos, identificaram fatores importantes e ainda acumularam conhecimento para o futuro a longo prazo. Estes afirmam ainda que a sua pesquisa fez importantes contribuições para a literatura existente na área.

Um dos pontos abordados pela logística de cadeias de abastecimento é o desenho da cadeia. Este tem um papel muito importante no desempenho da cadeia e é uma das decisões mais importantes na gestão de cadeias [23].

Empresas que operam na mesma indústria podem ter cadeias de abastecimento diferentes. Sendo assim os resultados obtidos para a cadeia de uma empresa podem não ser os mesmos para a de outra empresa [10].

Quando se está a desenhar a cadeia é necessário antecipar decisões de produção, distribuição, armazenamento, transporte e gestão da procura, bem como níveis de serviço e receitas. Dos principais fatores que contribuem para a complexidade do desenho de cadeias, o impacto que o desenho tem a longo prazo é um deles, pois as instalações da cadeia são feitas para durar vários anos [24].

O desenho de cadeias de abastecimento é utilizado para se obter as localizações e tamanho ótimos das instalações e também o fluxo que passa por cada instalação. Localizar as diferentes instalações ao longo dos diferentes níveis da cadeia é uma das decisões mais críticas a tomar no desenho de cadeias de abastecimento [19].

Beamon [9] define os indicadores de desempenho como um fator importante. Os indicadores são usados para avaliar a eficiência e/ou eficácia de um sistema e comparar este com diferentes alternativas. Os indicadores podem ser de dois tipos: qualitativos e quantitativos, sendo que estes últimos foram divididos em relativos ao custo e relativos à capacidade de resposta ao cliente. Dentro dos indicadores qualitativos temos:

- Satisfação dos clientes;
- Flexibilidade da cadeia;
- Integração do fluxo de informação e materiais;

- Desempenho dos fornecedores;

Como indicadores quantitativos relativos ao custo temos:

- Minimização do custo;
- Maximização das vendas;
- Maximização do lucro;
- Minimização do investimento de inventário;
- Maximização do retorno de investimento;

Como indicadores quantitativos relativos à capacidade de resposta ao cliente temos:

- Maximização dos pedidos cumpridos a tempo;
- Minimização do intervalo de tempo entre a data de entrega prometida e a real;
- Minimização do *lead time*;

Alguns destes e outros indicadores serão mais à frente utilizados para analisar o desempenho dos modelos desenvolvidos.

Nos últimos anos tem crescido o número de modelos matemáticos para a resolução de problemas de desenho. Alguns desses modelos têm em conta vários níveis da rede logística, múltiplos períodos, vários produtos, vários tipos de tecnologia utilizados, diferentes modos de transporte, bem como os diferentes tipos de instalações existentes [19].

Amin e Baki [16], propõem um modelo de programação linear inteira mista multi-objetivo para o desenho de uma cadeia de abastecimento global em *loop*-fechado. A cadeia inclui vários fornecedores, centros de distribuição, produtos, centros de recolha, mercados e plantas. O modelo considera também a incerteza na procura (tendo sido usada lógica difusa para lidar com este problema) e também taxas de importação e de câmbio, devido à existência de fornecedores nacionais e internacionais na cadeia. Este modelo tem dois objetivos, sendo o primeiro maximizar as encomendas entregues a tempo pelos fornecedores. O segundo objetivo é maximizar o lucro total da cadeia. Como resultados obtém a configuração da cadeia e seleciona os melhores fornecedores.

Mousazadeh et al. [23], propõem um modelo de programação linear para um problema de desenho da cadeia de abastecimento de uma farmacêutica. Este tem como objetivo minimizar o custo total e as encomendas que não são satisfeitas.

No caso de Yun et al. [22], foi proposto um modelo para a localização de instalações. O objetivo do modelo é determinar a melhor localização das instalações e atribuição destas aos clientes, que minimiza o custo total. O custo total inclui o investimento das instalações e os custos de transporte e penalizações esperados. Os resultados obtidos mostraram que o modelo consegue resolver de forma eficiente o problema, conseguindo a solução ótima ou uma solução ótima aproximada, para diferentes instâncias testadas.

Em [24] os autores desenvolvem um modelo de programação linear para conseguirem as melhores decisões sobre a localização de instalações, padrões de cobertura da procura e veículos necessários para uma cadeia de abastecimento sob riscos operacionais e de interrupção.

You e Grossmann [18], criaram um modelo para o desenho de uma cadeia de abastecimento responsiva que tem em conta o inventário e o stock de segurança para procura incerta. Este modelo foi utilizado para determinar que processos incluir na cadeia. O modelo criado foi um modelo inteiro misto multi-período de programação não linear, que teve em conta locais de produção e centros de distribuição, fornecedores, níveis e escalonamento da produção e níveis de inventário. O objetivo deste foi maximizar o valor atual líquido e minimizar o *lead time* esperado. Os resultados obtidos para dois exemplos, mostraram que para mudanças pequenas no valor do *lead time* esperado, podem ocorrer mudanças significativas no valor atual líquido e no desenho da cadeia.

Eskandarpour et al. [19], realizaram uma análise de artigos publicados neste âmbito, que apresentavam modelos de otimização com pelo menos duas das três dimensões de desenvolvimento sustentável. Os artigos observados mostraram que grande parte destes eram focados em fatores ambientais e económicos. Os modelos mais utilizados foram os modelos inteiros mistos de programação linear (MILP) determinísticos.

2.2 Gestão de stocks

A gestão de stocks é importante para um bom funcionamento da cadeia de abastecimento. O tipo de gestão de stocks aplicada irá variar dependendo do tipo de negócio praticado, do tipo de produtos/serviços comercializados, do tipo de procura, bem como do tipo de stock em causa. Os stocks podem ser classificados desde matéria-prima até produto final ao longo da cadeia. O uso de stocks tem custos associados, tais como custos de manutenção, de posse e rutura, por isso é importante garantir uma boa gestão do inventário de modo a conseguir minimizar esses custos [12, 3].

A existência de stocks permite manter uma certa independência entre operações, pois permite que, em caso de avaria de alguma máquina de um processo anterior, seja possível continuar a produção. Ajuda a combater as variações da procura e situações não planeadas, mantendo um stock de segurança para este tipo de ocorrências [14].

Uma fraca gestão de stocks é prejudicial para o negócio, pois quando existem níveis de stock elevados, estes podem muitas vezes estar a esconder problemas graves de produtividade (figura 2.2), visto que níveis elevados de stock podem encobrir problemas de qualidade, problemas de fiabilidade de máquinas, filas de espera ao longo da produção, acumulação de ordens, entre outros problemas [2].

2.2.1 Métodos de revisão de stock

Existem dois métodos principais para revisão de stocks, sendo eles o método de revisão contínua e o método de revisão periódico. No método de revisão contínua, tal como o nome indica,

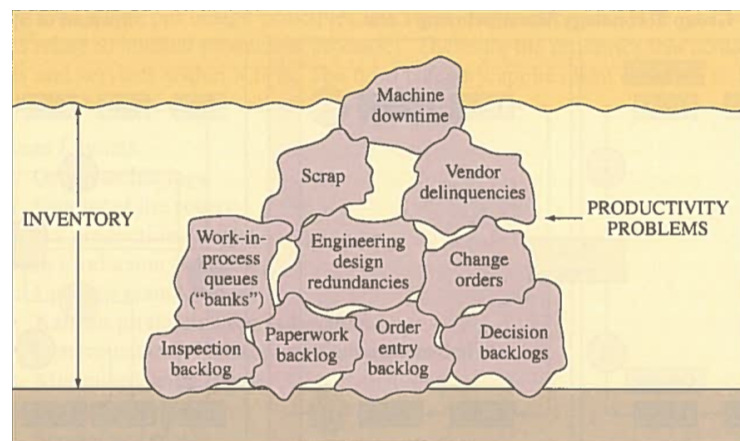


Figura 2.2: Problemas de produtividade [2]

existe uma vigilância contínua do nível de stock nominal (nível de stock em armazém mais quantidade das encomendas pendentes a fornecedores), e quando este fica abaixo do ponto de encomenda é realizada uma encomenda aos fornecedores [12, 3, 14]. Através das figuras 2.3 e 2.4 é possível verificar como é realizada a revisão de inventário neste método. A primeira figura mostra o modelo ideal com procura constante, enquanto que a segunda apresenta um modelo mais próximo da realidade com procura variável e a adição de stock de segurança para combater as situações já em cima descritas.

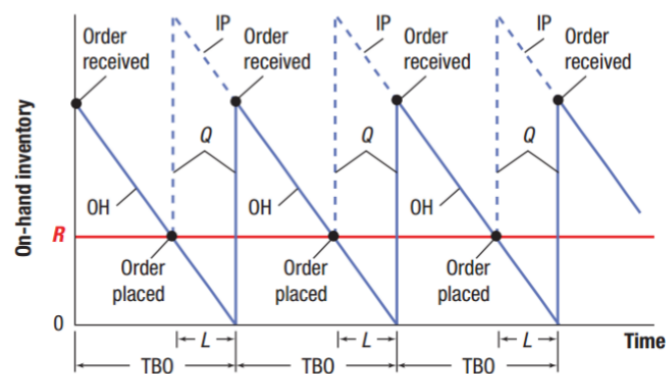


Figura 2.3: Método de revisão contínuo [3]

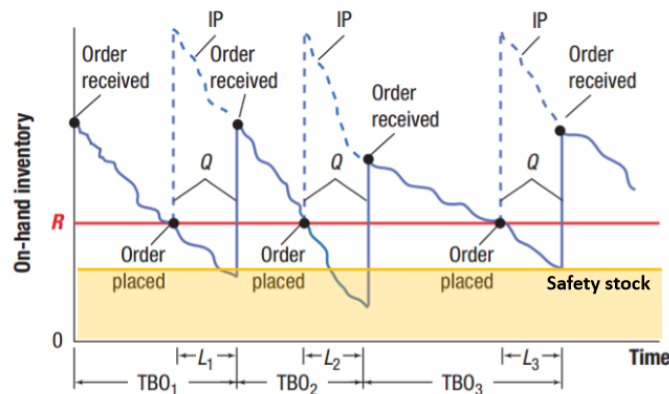


Figura 2.4: Método de revisão contínuo com stock de segurança [3]

O método de revisão periódico consiste na revisão do nível de stock em intervalos de tempo constantes. Ao fim de cada intervalo de tempo é lançada uma encomenda aos fornecedores para voltar a elevar o nível de stock até ao valor do nível de enchimento desejado [12, 3, 14]. A figura 2.5 mostra o funcionamento do método de revisão periódico, onde é possível observar que o valor a encomendar ao fornecedor varia de período para período consoante a procura existente em cada intervalo de tempo.

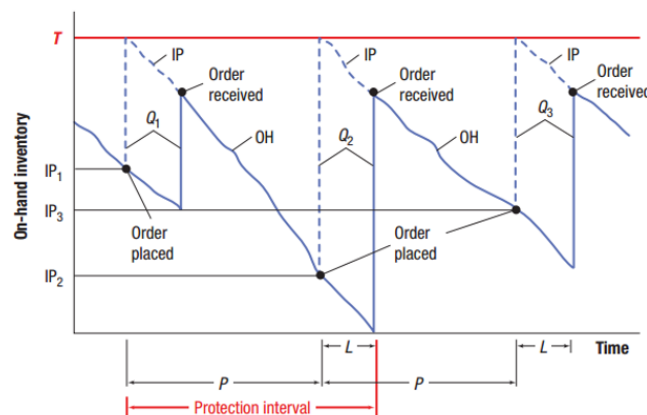


Figura 2.5: Método de revisão periódico [3]

O ponto de encomenda para o método de revisão contínua e o nível de enchimento para o método de revisão periódica são calculados de modo a que não exista rutura de stock [12, 3, 14], sendo que estes valores são calculados com base na procura.

Ambos os métodos têm as suas vantagens e desvantagens. O método de revisão contínuo permite uma gestão mais simples, mas por outro lado não permite agrupar encomendas de produtos diferentes. Já o método de revisão periódica permite agrupar encomendas de produtos diferentes, visto que as encomendas são realizadas periodicamente, mas é mais sensível a variações da procura, sendo que na ocorrência de um aumento brusco da procura, pode acontecer ruturas de stock

mais facilmente [12].

2.3 Additive manufacturing

Additive manufacturing é uma técnica de produção em que os produtos são fabricados com recurso a software de desenho assistido por computador. A matéria-prima consumida para a produção é usada para formar camadas finas de material, que no final darão forma ao modelo tridimensional (3D) criado com o software de desenho (representado na figura 2.6) [4]. Ao contrário da tecnologia de produção tradicional, que pode precisar realizar *set-ups* antes de produzir e certas ferramentas para a realização de alguma tarefa, *additive manufacturing* só precisa de matéria-prima e do modelo 3D do produto como entradas [25].

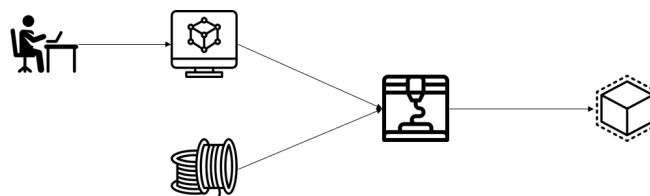


Figura 2.6: Impressão 3D [4]

Foi na década de 90 que esta tecnologia começou a ganhar força no mercado, após vários anos de pesquisa e desenvolvimento na área [26].

Este tipo de tecnologia tem um grande impacto na indústria em geral, uma vez que permite fabricar produtos com elevado grau de customização e também reduzir custos de produção, *lead time* e ainda a complexidade da cadeia de abastecimento. Atualmente este método de produção é especialmente benéfico para baixos volumes de produção [13]. Outra grande vantagem do uso de *additive manufacturing* é permitir uma mudança instantânea do design do produto, o que oferece uma grande flexibilidade tanto para o produtor como para o cliente. Pode ser aplicada em vários tipos de indústria, tais como a eletrónica, aeroespacial [25], mas também estão a ser feitas pesquisas para ser possível aplicar este tipo de tecnologia na medicina [27], bem como na indústria alimentar [28]. Pode ser também aplicada num modelo de negócios de venda de serviços, com empresas a serem subcontratadas para produzir com recurso a tecnologia de impressão 3D [29].

Em [4] os autores propõem um *framework* para determinar a estratégia de produção ótima, usando os métodos de produção tradicionais e tecnologia de *additive manufacturing*. Os resultados obtidos mostraram que a tecnologia moderna deste tipo pode, para produção de baixo volume, ser viável e como esta é uma tecnologia de produção autónoma os custos de mão de obra são reduzidos. Como é eficaz para produtos de tamanho reduzido e que necessitam de vários moldes, pode ajudar a transitar de um modelo *make-to-stock* para um modelo *make-on-demand* para produtos com pouca procura, permitindo assim maior flexibilidade e customização nos produtos. Devido ao tempo reduzido de enviar o produto para o mercado, o uso desta tecnologia é apropriado para

a produção de produtos inovadores. Através da aplicação do *framework* desenvolvido os autores confirmam que *additive manufacturing* tem o necessário para ser incluído no conjunto de técnicas de produção existentes.

Contudo, o seu uso traz consigo implicações para os modelos de negócio. A evolução conjunta da tecnologia e do modelo de negócio mostra a relevância das estruturas da cadeia de abastecimento, e a combinação de *additive manufacturing* e modelos de negócio traz consigo consequências para a maneira como uma empresa organiza as suas atividades [13].

Para a indústria de peças e componentes de reposição, *additive manufacturing* pode trazer bastantes mudanças no futuro, devido ao baixo custo de produção, reduzido tempo de produção, maior robustez da cadeia de abastecimento, entre outros fatores. Os seus vários benefícios podem, no que diz respeito à cadeia de abastecimento, trazer alterações no modo de funcionamento, em áreas como a logística e a gestão de stocks [8].

Mesmo com a evolução sofrida ao longo dos anos esta tecnologia ainda tem muitas oportunidades de melhoria e de aplicação em várias indústrias diferentes [30].

2.4 Simulação

Simulação tem vindo a ser usada como ferramenta para sistemas de apoio à decisão, podendo ser considerado um recurso chave para uma empresa. No domínio das cadeias de abastecimento esta ferramenta tem a capacidade de representar restrições complexas e de representar o comportamento do sistema ao longo do tempo [5].

Nos últimos anos, o uso de técnicas de simulação nas cadeias de abastecimento tem vindo a crescer [31]. O seu uso ao longo de uma cadeia pode permitir obter um melhor entendimento do comportamento geral e assim ajudar nas tomadas de decisão, a analisar problemas de produção e de inventário [31], a perceber o impacto das dinâmicas da cadeia [32], a avaliar o desempenho de sistemas logísticos, sejam eles integrados ou distribuídos [33], a destacar os níveis de eficiência e ainda a avaliar alterações na cadeia de abastecimento [34].

2.4.1 Vantagens e Desvantagens da simulação

O uso de ferramentas de simulação traz consigo várias vantagens, mas também desvantagens. Como algumas vantagens do seu uso temos [35]:

- Testar mudanças e adições propostas sem comprometer recursos;
- Acelerar ou desacelerar fenómenos, para poderem ser estudados, com a habilidade de manipular o tempo de simulação;
- Explorar novos cenários sem comprometer o sistema real;
- Diagnosticar problemas e ter uma melhor compreensão das variáveis e das interações entre estas;

- Identificar restrições no sistema real, como por exemplo, numa linha de produção, o gargalo;
- Ajuda a compreender como o sistema funciona;
- Permite responder a perguntas “e se” para o desenho de novos sistemas e redesenho de antigos;
- Precisa de pouco investimento;
- Ajuda a treinar equipas, permitindo que os membros aprendam com os erros cometidos;
- Especificar requisitos para o desenho do sistema;

Algumas das desvantagens do uso de simulação são [35]:

- Requer treino especializado;
- Os resultados obtidos podem ser difíceis de analisar;
- A modelação e análise dos modelos pode consumir muito tempo;
- Pode não ser possível adaptar modelos construídos para um certo caso para outros casos;

2.4.2 Tipos de abordagens

Os modelos de simulação podem ser abordados de duas maneiras diferentes, como um modelo único ou como múltiplos modelos mais pequenos, sendo que uma cadeia de abastecimento pode ser simulada usando as duas abordagens. O modelo único (figura 2.7) é uma abordagem de simulação que utiliza um só modelo para representar e simular a cadeia de abastecimento completa [5].

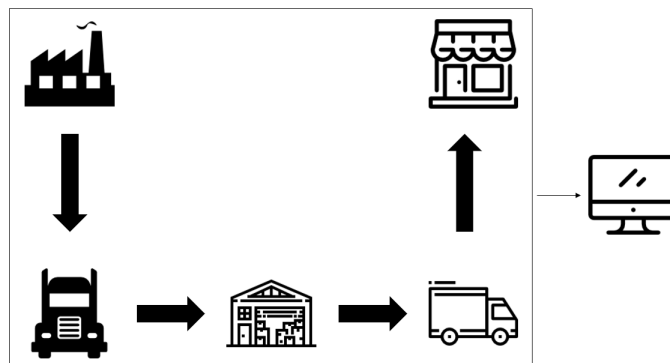


Figura 2.7: Modelo Único [5]

Já a abordagem de múltiplos modelos (figura 2.8) recorre a vários modelos mais pequenos, cada um representando uma parte da cadeia de abastecimento, que são executados em paralelo ou de forma distribuída, para simular a cadeia de abastecimento. Estes vários modelos mais pequenos, podem ser construídos com recurso a diferentes ferramentas e linguagens [5], permitindo criar modelos mais versáteis e também reutilizar modelos já existentes.

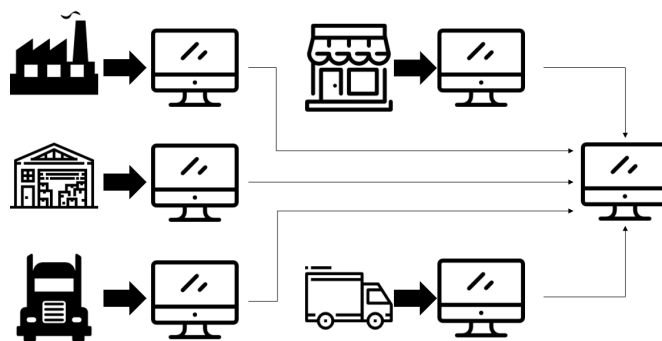


Figura 2.8: Múltiplos modelos [5]

Os modelos anteriormente descritos podem ser simulados com recurso a diferentes técnicas de simulação, tais como Simulação de Eventos Discretos, *System Dynamics* e Modelação Baseada em Agentes.

2.4.3 *System Dynamics*

A *System Dynamics* é geralmente utilizada em casos de simulação a nível estratégico. Contudo, tal como a simulação de eventos discretos, é utilizada para compreender melhor o comportamento do sistema a simular ao longo do tempo, e também, o desempenho do sistema para diferentes situações. No que diz respeito às mudanças de estado no sistema, em dinâmica de sistemas estas ocorrem continuamente ao longo do tempo. Aqui as entidades não são representadas de forma individual no modelo [36].

2.4.4 Modelação Baseada em Agentes

A Modelação Baseada em Agentes é uma técnica de simulação que se foca na modelação das entidades e nas interações entre estas. O conceito de filas de espera não existe neste tipo de modelos, nem o conceito de fluxo. As entidades modeladas podem tomar a iniciativa em realizar ações, operações, etc. Para estes modelos as distribuições utilizadas como parâmetros de entrada são geralmente baseadas em teorias ou dados subjetivos [37].

2.4.5 Simulação de Eventos Discretos

A Simulação de Eventos Discretos é um dos métodos de simulação mais comuns, sendo mais utilizada para simular problemas a nível operacional e tático. Os modelos são usados para compreender melhor o comportamento do sistema a simular ao longo do tempo, e o seu desempenho para diferentes situações. Estes são orientados aos processos, de modo a fazer representações detalhadas do sistema. Nestes modelos as filas de espera são elementos essenciais e o comportamento do fluxo das entidades no sistema é modelado. As mudanças de estado ocorrem em instantes de

tempo e as entidades são representadas individualmente no modelo. Quando se quer alguma variabilidade no modelo, a simulação de eventos discretos pode ser usada, pois os modelos gerados são geralmente estocásticos, devido ao uso de distribuições nestes. Os parâmetros de entrada das distribuições são, geralmente, dados medidos ou recolhidos [37, 36].

Tako e Robinson [36] realizaram um estudo sobre a utilização de simulação de eventos discretos e *System Dynamics* como sistemas de apoio à decisão em logística e gestão da cadeia de abastecimento. O estudo mostrou que é mais frequente o uso de simulação de eventos discretos neste contexto, mas que ambos os métodos de simulação podem ser utilizados para simular problemas de logística e gestão de cadeias de abastecimento.

A simulação permite avaliar desenhos alternativos de cadeias de abastecimento e o impacto do *lead time* e níveis de qualidade nos custos [6], mostrando-se bastante útil a sua utilização na gestão de cadeias de abastecimento, sendo esta uma das razões do crescimento do seu uso nesta área, como foi referido em cima. Em [6], os autores criaram modelos de simulação de eventos discretos para diferentes configurações da cadeia de abastecimento, seguindo uma metodologia de 9 atividades. A metodologia utilizada está presente na figura 2.9.

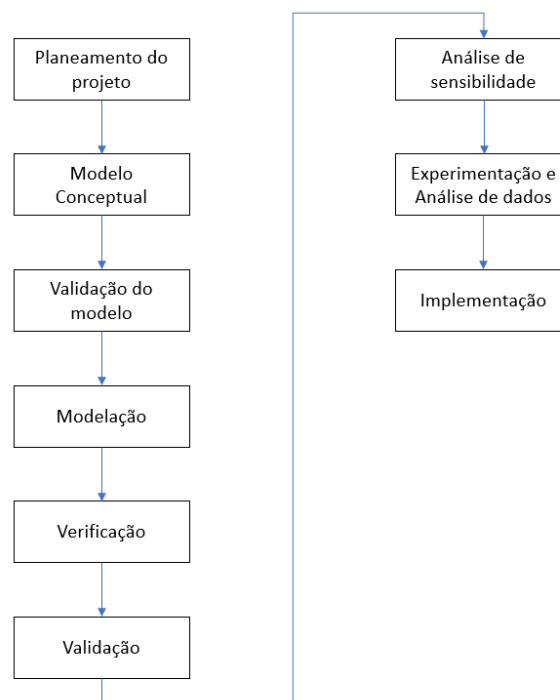


Figura 2.9: Metodologia usada em [6]

A etapa de planeamento do projeto é utilizada para estimar o tempo de projeto e definir o primeiro conjunto de ensaios. Na etapa seguinte, modelo conceptual, o sistema a ser modelado é descrito num *flowchart* simples, para se retirar a lógica e dados do sistema, necessários para realizar a modelação. A validação do modelo é a etapa em que se procede à revisão do modelo conceptual desenvolvido, e se necessário, à realização de correções. A quarta etapa é a modelação,

onde se vai transformar o modelo conceptual desenvolvido num modelo de simulação, com recurso a linguagens ou softwares de simulação. A etapa de verificação tem como objetivo testar o modelo de simulação, comparando este com o modelo conceptual e realizando correções se necessário. A etapa seguinte, a de validação, visa testar o modelo de simulação contra o sistema real, e mais uma vez, realizar as correções necessárias. Na análise de sensibilidades são examinados os efeitos provocados nas saídas do modelo pela variação das entradas. Experimentação e análise de dados é a etapa onde se realizam os ensaios definidos previamente e se recolhem e analisam os dados obtidos. Nesta mesma etapa ainda se pode definir novos ensaios e repetir a etapa. Por último temos a etapa de implementação, que vai utilizar os dados analisados para recomendar algumas decisões e ajudar na implementação.

As atividades de verificação e validação se não forem realizadas corretamente podem criar três tipos de erros que podem descredibilizar os resultados obtidos. Os autores acrescentam ainda que quando o modelo da cadeia de abastecimento é bastante extenso, pode ser difícil validar o modelo como um todo devido à falta de indicadores de desempenho da cadeia. Em alternativa, cada parte do modelo é validada individualmente, validando assim o modelo como um todo. Esta metodologia de simulação mostrou-se bem adaptada para o caso de estudo da cadeia de abastecimento de uma empresa da indústria de telecomunicações.

Para o estudo de uma cadeia de abastecimento de produção de motores em [31], o uso de modelos de simulação obteve resultados satisfatórios, apontando comportamentos indesejados da cadeia.

Em [32] foi aplicado o uso de simulação a uma cadeia de abastecimento de produtos com tempo de vida reduzido, sendo que os autores acreditam que o modelo por eles criado pode ajudar na tomada de decisões da gestão da cadeia.

Bottani e Montanari [34] desenvolveram um modelo de simulação de eventos discretos para analisar o efeito chicote e os custos totais em diferentes possíveis configurações de uma cadeia de abastecimento de produtos de consumo rápido. Com isto eles comprovaram que o desenho da cadeia de abastecimento influencia tanto o custo total como o efeito chicote observado.

A revisão de literatura existente na área da simulação, realizada por Terzi e Cavalieri [5], comprovou que modelos de simulação foram aplicados, com bons resultados, em diferentes estudos da área da logística, utilizando diferentes tipos de modelos (modelo único e múltiplos modelos), ferramentas e linguagens.

Os autores, Longo e Mirabelli, propõem [38] um modelo de simulação de eventos discretos para auxílio de gestão de cadeias de abastecimento. O modelo foi desenvolvido com recurso a uma ferramenta de simulação comercial, com uma metodologia de simulação orientada a objetos. A interface da simulação permite alterar os cenários a simular e os resultados obtidos são diretamente exportados para folhas de Excel. É proposto ainda o uso de ferramentas como DOE e ANOVA para melhorar a capacidade de tomada de decisão.

Capítulo 3

Abordagem metodológica

Neste capítulo vão ser abordados três pontos: caso de estudo, metodologia e modelos. O primeiro ponto, o caso de estudo desta dissertação, vai ser apresentado em detalhe, explicando o seu foco. Seguidamente será apresentada a metodologia de trabalho que foi utilizada para abordar o caso de estudo em questão. Por último, serão apresentados, detalhadamente, os vários modelos utilizados e desenvolvidos durante a realização da dissertação, bem como alguns conceitos básicos do software de simulação utilizado para auxiliar na compreensão de aspetos dos modelos de simulação.

3.1 Caso de estudo

O caso de estudo desta dissertação destina-se a desenvolver um modelo de simulação de uma cadeia de abastecimento de uma empresa de manutenção de elevadores, e integrar esse modelo com um modelo de otimização, para assim se obter um modelo de otimização/simulação. Este modelo será usado para avaliar o impacto do uso de *additive manufacturing* na cadeia de abastecimento da empresa, no que diz respeito à produção de cinco tipos de peças de reposição, de modo a reduzir o consumo deste tipo de peças a fornecedores externos, que faz aumentar os custos e o *lead time*.

Numa primeira parte, o modelo de otimização, visa obter a melhor configuração da cadeia de abastecimento, segundo os parâmetros de entrada deste. Numa segunda parte temos o modelo de simulação, que visa simular o comportamento da cadeia ao longo do tempo, com recurso ao software de simulação Simio, de modo a avaliar a performance da configuração obtida, tendo como parâmetros de entrada os resultados obtidos pela otimização.

A cadeia de abastecimento em estudo, tal como foi dito previamente, é referente a uma empresa de produção e manutenção de elevadores. Esta é constituída por estações remotas (o equivalente a centros de distribuição), fornecedores externos e clientes finais. Uma representação simples da cadeia atual está ilustrada na figura 3.1.

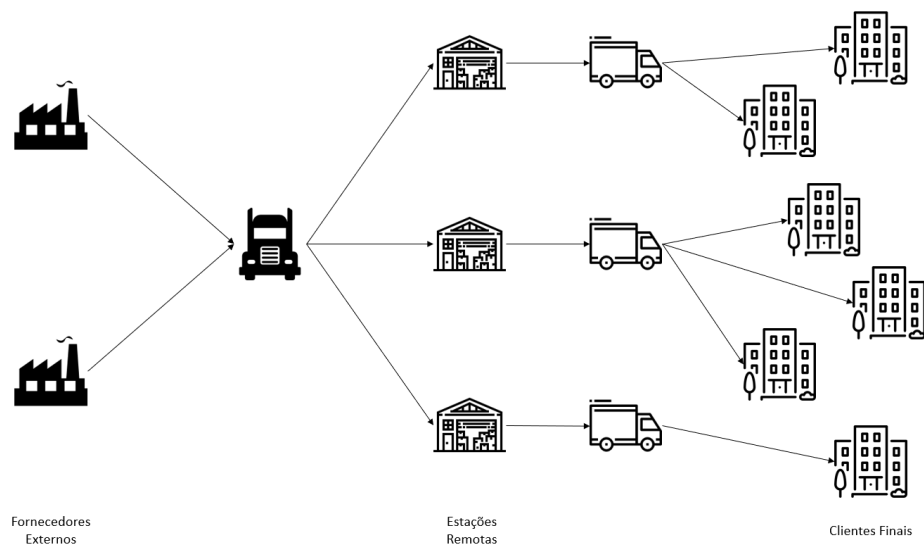


Figura 3.1: Cadeia de abastecimento atual

3.1.1 Fornecedores Externos

Os fornecedores externos irão fornecer algum(s) tipo(s) de peça(s) suplente(s) a alguma(s) da(s) estação(s) remota(s), dependendo da configuração da cadeia obtida pelo modelo de otimização. É assumido que os fornecedores externos têm sempre material para ser enviado, quando encomendado, e apresentam um *lead time* médio e um custo associado para cada estação remota que realiza a encomenda.

3.1.2 Estações Remotas

As estações remotas representam os centros da empresa que enviam as peças para se proceder à manutenção dos elevadores, manutenções estas que podem ser preventivas ou curativas. São estas que recebem os pedidos vindos dos clientes finais, sendo que cada estação está encarregada de servir os clientes da empresa que se encontram nas regiões por elas abrangidas. Cada encomenda realizada por alguma das regiões que esta abrange tem custos e *lead time* associados.

Estas estações podem realizar encomendas a fornecedores externos, para reabastecer qualquer um dos tipos de peças que tenham em inventário ou tenha sido encomendada por um cliente.

É neste tipo de instalações que se pretende implementar o uso de *additive manufacturing* para a produção de peças de reposição. A política de gestão de stocks associada irá depender do resultado do modelo de otimização, ou seja, se esta passa ou não a produzir peças de reposição. Se passar a produzir, o modelo de otimização decide ainda quais peças serão produzidas e se irá fornecer ou não outras estações remotas.

3.1.3 Clientes finais

Os clientes finais são aqueles que têm os elevadores instalados nas suas propriedades, sejam estas propriedades, edifícios públicos, fábricas, blocos de apartamentos, etc.

3.1.4 Cadeia de abastecimento em estudo

A cadeia de abastecimento que se pretende implementar com este caso de estudo apresenta na sua constituição os fornecedores externos, as estações remotas e os clientes finais, tal como no caso atual. Os fornecedores externos e os clientes finais vão continuar a funcionar e a ser representados do mesmo modo, sendo que as alterações a implementar vão ser realizadas nas estações remotas.

Vai ser estudado o caso de se vir a instalar impressoras 3D em estações remotas, para a produção de cinco tipos de peças específicas. No caso de ser instalada alguma impressora 3D em alguma estação, esta pode ser usada para produzir um tipo de peça, vários, ou até todos os cinco tipos. As estações que passam a produzir, podem vir ou não a ser fornecedores de peças para outras estações remotas da cadeia, ficando a nova cadeia de abastecimento, por exemplo, como a apresentada na figura 3.2.

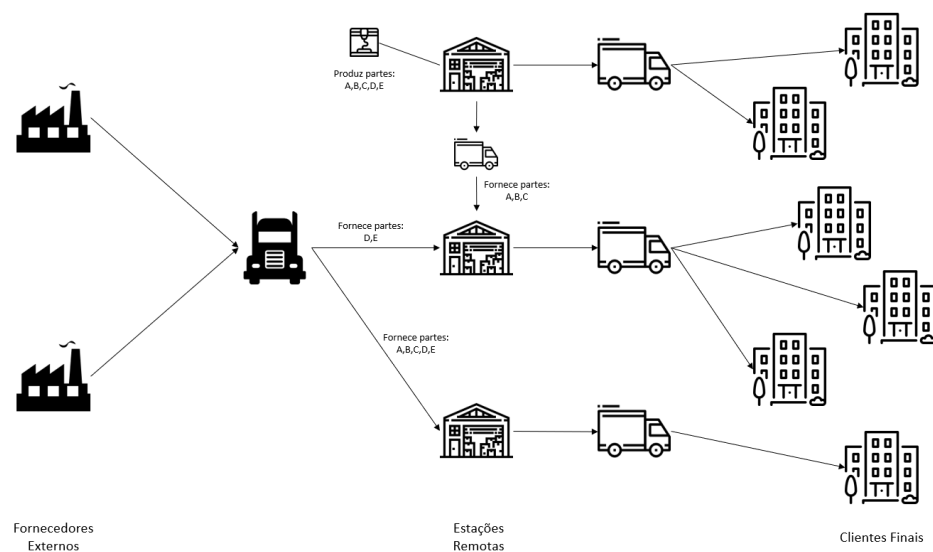


Figura 3.2: Cadeia de abastecimento em estudo

A gestão de stocks, para as estações que não vão ter instaladas impressoras 3D, vai ser uma política de revisão periódica de stock, de x em x dias, dos níveis inventário existente. No caso das estações que começam a produzir, estas vão sofrer alterações, no que se refere aos tipos de peças produzidas, sendo que para as peças que não são produzidas, estas têm a mesma política de revisão periódica em cima descrita. Para os tipos de peças produzidas, sempre que houver uma encomenda por parte de um cliente ou outra estação remota para estas, será lançada uma ordem de produção para manter os níveis de inventário na posição desejada.

As encomendas realizadas pelas estações remotas poderão ser de múltiplos tipos de peças, sendo que só serão enviadas ao seu destino quando todas as peças estiverem completas.

A cadeia de abastecimento poderá adaptar-se ao longo do tempo às condições das estações remotas, custos e *lead time*, ou seja, alterar a sua configuração no que diz respeito à localização e produção das impressoras 3D e fornecimento de peças. Os inputs do modelo de otimização, que irão originar a configuração ótima da cadeia, são maioritariamente custos e *lead times*, mas também são passados os fornecedores externos e as estações remotas existentes, bem como os tipos de peça em estudo. Analisando posteriormente a configuração obtida, com recurso ao modelo de simulação, será possível verificar a validade, viabilidade e impacto da nova configuração na cadeia de abastecimento.

3.2 Metodologia

A metodologia utilizada neste caso de estudo tem algumas similitudes com a apresentada previamente no capítulo 2. Ilustrada na figura 3.1, esta metodologia é composta por 7 etapas.

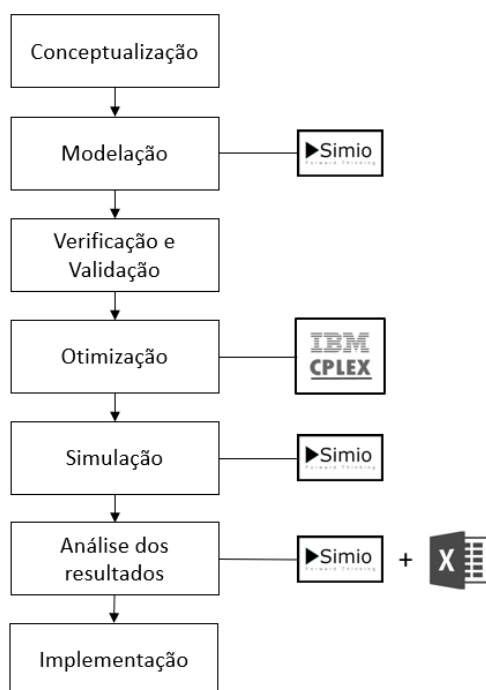


Figura 3.3: Metodologia utilizada

Esta metodologia começa com a etapa de conceptualização. Foram definidos e validados todos os requisitos do caso de estudo que o modelo de simulação deve cumprir, de modo a conceber o modelo mais fiel possível. São também estabelecidos os requisitos para interligação entre o modelo de otimização e o modelo de simulação. A etapa de modelação é realizada com recurso

à ferramenta de simulação Simio. Aqui vai ser modelada a cadeia de abastecimento da empresa com todos os detalhes estabelecidos para este caso de estudo.

A verificação e validação é uma etapa muito importante, pois aqui vão ser testado o trabalho desenvolvido, de modo a encontrar possíveis erros, e ainda se vai validar o modelo. Negligenciar esta etapa pode originar erros de vários tipos. Passando para a etapa seguinte, otimização, aqui irá ser executado o modelo de otimização, que foi desenvolvido em CPLEX, com os parâmetros de entrada definidos previamente para o estudo. Os resultados originados por esta etapa serão usados como parâmetros de entrada na etapa seguinte. Na simulação, tal como dito anteriormente, os resultados obtidos na etapa anterior serão utilizados para correr o modelo de simulação em Simio. O modelo simulação vai originar os resultados da corrida em forma de relatório e *dashboards*, para uma melhor análise dos mesmos.

Os resultados do modelo de simulação vão ser analisados na etapa seguinte, análise de resultados, com o intuito de verificar, validar e medir o impacto da nova configuração da cadeia de abastecimento obtida nas etapas anteriores. Caso necessário, são realizadas as alterações necessárias. No caso de os resultados obtidos pelo modelo serem satisfatórios, irá passar-se para a próxima etapa, implementação, onde serão efetuadas as mudanças observadas anteriormente na cadeia de abastecimento da empresa.

O modelo de otimização vai ser apresentado na secção seguinte. Na mesma secção vão ser mostrados e detalhados os modelos de simulação desenvolvidos para este caso de estudo.

3.3 Modelos

Para a realização desta dissertação, foram utilizados um modelo de otimização (já desenvolvido e implementado) e dois modelos de simulação. Os modelos de simulação representam duas configurações diferentes da cadeia de abastecimento, que apresentam um número de fornecedores externos e tipos de peças diferentes. Cada um deles vai ser apresentado em detalhe a seguir.

3.3.1 Modelo de otimização

O modelo de otimização adotado nesta dissertação foi proposto por João Basto, Narciso Caldas, Samuel Moniz e José Soeiro Ferreira para o artigo “*Optimal Design of Additive Manufacturing Supply Chains*” a ser publicado. Este está implementado no software ILOG CPLEX Optimization Studio.

3.3.1.1 Parâmetros

Os parâmetros deste modelo são os seguintes:

- D_{rp} : Procura anual da peça p na região r
- no_{rp} : Número anual de encomendas da peça p na região r
- FC^R : Custo anual fixo de uma estação remota

FC^P : Custo anual fixo de posse de uma impressora 3D
 C^P : Capacidade anual, em horas, de uma impressora 3D
 $price_{sp}$: Preço de uma unidade da peça p do fornecedor s
 uc_p : Custo unitário de produção da peça p numa estação remota
 pt_p : Tempo de produção da peça p numa impressora 3D
 oc_{sr} : Custo da estação remota r fazer uma encomenda ao fornecedor s
 \overline{SL}_{sr} : *Lead time* de entrega médio do fornecedor s para a região r
 dc_r : Custo de entrega da estação remota r para o cliente final
 \overline{T}_r : Tempo de entrega médio da estação remota r para o cliente final
 cc : Percentagem do inventário médio aplicada no calculo do custo capital
 $ioc_{r'r}$: Custo de encomenda interna da estação remota r para a estação remota r'
 $\overline{ISL}_{r'r}$: *Lead time* de entrega médio da estação remota r' para a estação remota r
 RT : Tempo entre revisões de inventário de uma estação remota em anos
 $config = (a_{r'r}, \forall r' \in R, r \in R)$, onde $a_{r'r} = 1$ indica que a estação r' abastece a estação r
 sc : Custo de ocorrer uma quebra de inventário durante uma revisão periódica
 $\sigma_{config\ rp}$: Desvio padrão da procura numa revisão periódica para a peça p na estação remota r , quando a configuração de fornecimento interna é $config$
 M : Número "muito grande" (ex.: 100000)

3.3.1.2 Variáveis de decisão

As variáveis de decisão do modelo são as seguintes:

n_r : Número de impressoras 3D alocadas na estação remota r
 $y_{r'rp}$: Variável binária: 1 se a estação remota r' fornece a peça p à estação remota r , 0 caso contrário.
 z_{srp} : Variável binária: 1 se o fornecedor s fornecer a peça p à estação remota r , 0 caso contrário.
 x_{rp} : Variável binária: 1 se a estação remota r produzir a peça p , 0 caso contrário.
 i_{sr} : Variável binária: 1 se o fornecedor s fornece a estação remota r , 0 caso contrário.
 $\delta_{config\ p}$: 1 se a configuração de fornecimento interna $config$ é utilizada para a peça p , 0 caso contrário.
 $score_{rp}$: z-score do stock de segurança da peça p para a estação remota r .
 $score1_{rp}$: Componente 1 do z-score do stock de segurança da peça p para a estação remota r .
 $score2_{rp}$: Componente 2 do z-score do stock de segurança da peça p para a estação remota r .
 $score3_{rp}$: Componente 3 do z-score do stock de segurança da peça p para a estação remota r .
 $\omega1_{rp}$: Variável binária auxiliar para o componente 1 do z-score do stock de segurança da peça p para a estação remota r .
 $\omega2_{rp}$: Variável binária auxiliar para o componente 2 do z-score do stock de segurança da peça p para a estação remota r .
 $\omega3_{rp}$: Variável binária auxiliar para o componente 3 do z-score do stock de segurança da peça p para a estação remota r .

- α_{rp} : Nível de serviço da peça p para a estação remota r
- ssc_{rp} : Custo do stock de segurança para a peça p na estação remota r
- ss_{rp} : Stock de segurança para a peça p na estação remota r
- $outl_{rp}$: Nível de enchimento para a peça p para a estação remota r

3.3.1.3 Restrições

As restrições do modelo são as seguintes:

- O número de impressoras 3D alocadas a uma estação remota tem de ser maior ou igual a 0.

$$n_r \geq 0, \forall r \in R$$

- Uma estação só pode fornecer outra estação em tipos de peças que esta produz.

$$y_{r'rp} \leq x_{r'p}, \forall r' \in R, r \in R, p \in P$$

- Uma estação só pode produzir um tipo de peça se esta for para consumo próprio e/ou para fornecer outra estação.

$$\sum_{r \in R} y_{r'rp} \geq x_{r'p}, \forall r' \in R, r \in R, p \in P$$

- Uma estação não pode produzir acima da sua capacidade máxima.

$$\sum_{r \in R, p \in P} y_{r'rp} * D_{rp} * pt_p \leq C^P * n_{r'}, \forall r' \in R$$

- Uma estação remota tem de ser fornecida para um tipo de peça por um e só um fornecedor ou estação remota.

$$\sum_{r' \in R} y_{r'rp} + \sum_{s \in S} z_{srp} = 1, \forall r \in R, p \in P$$

- Restrições auxiliares para definir o valor de is_{sr} .

$$is_{sr} \geq z_{srp}, \forall s \in S, r \in R, p \in P$$

$$is_{sr} \leq \sum_{p \in P} z_{srp}, \forall s \in S, r \in R$$

- Restrições auxiliares para definir o valor de $\delta_{config p}$.

$$a_{r'r} - y_{r'rp} \geq 0 - (1 - \delta_{config p}) * M, \forall config \in C, r \in R, r' \in R, p \in P$$

$$a_{r'r} - y_{r'rp} \leq 0 + (1 - \delta_{config\ p}) * M, \forall config \in C, r \in R, r' \in R, p \in P$$

$$\sum_{config \in C} \delta_{config\ p} = 1, \forall p \in P$$

- O z-score é a soma dos seus componentes.

$$score_{rp} = score1_{rp} + score2_{rp} + score3_{rp}, \forall r \in R, p \in P$$

- Apenas uma das três partes que definem a função por partes do z-score pode estar ativa.

$$\omega1_{rp} + \omega2_{rp} + \omega3_{rp} = 1, \forall r \in R, p \in P$$

- Uma componente do z-score pode ser diferente de 0 se e só se a sua parte correspondente da função por partes está ativa.

$$-M * \omega1_{rp} \leq score1_{rp} \leq -1.5 * \omega1_{rp}, \forall r \in R, p \in P$$

$$-1.5 * \omega2_{rp} \leq score2_{rp} \leq 1.5 * \omega2_{rp}, \forall r \in R, p \in P$$

$$1.5 * \omega3_{rp} \leq score3_{rp} \leq M * \omega3_{rp}, \forall r \in R, p \in P$$

- Definição do nível de serviço para a estação remota r , peça p .

$$\alpha_{rp} = 0.5 * \omega2_{rp} + \omega3_{rp} + (1/3) * score2_{rp}, \forall r \in R, p \in P$$

- Definição do custo do stock de segurança para a estação remota r , peça p , quando é fornecida internamente.

$$ssc_{rp} \geq (-1 + \delta_{config\ p}) * M - \left(\sum_{s \in S} z_{srp} \right) * M + cc * \sigma_{config\ rp} * score_{rp} * uc_p, \forall config \in C, r \in R, p \in P$$

- Definição do custo do stock de segurança para a estação remota r , peça p , quando é fornecida externamente.

$$ssc_{rp} \geq (-1 + \delta_{config\ p}) * M - (1 - z_{srp}) * M + cc * \sigma_{config\ rp} * score_{rp} * price_{sp}, \\ \forall config \in C, s \in S, r \in R, p \in P$$

3.3.1.4 Função objetivo

A função objetivo do modelo é minimizar o custo total da cadeia de abastecimento.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{r \in R} (FC^R + n_r * FC^P) + \sum_{r', r \in R, p \in P} y_{r'rp} * D_{rp} * uc_p + \\
 & + \sum_{s \in S, r \in R, p \in P} (z_{srp} * D_{rp} * price_{sp}) + \\
 & + \sum_{s \in S, r \in R} i_{s_r} * 1/(RT) * oc_{sr} + \\
 & + \sum_{r' \in R, p \in P} \left(dc_{r'} * no_{r'p} + \sum_{r \in R \setminus r'} y_{r'rp} * (1/RT) * ioc_{r'r} \right) + \\
 & + cc * (RT/2) * \sum_{r' \in R, p \in P} \left(D_{r'p} * \sum_{s \in S} z_{sr'p} * price_{sp} + D_{r'p} * (1 - \sum_{s \in S} z_{sr'p}) * uc_p + uc_p * \sum_{r \in R \setminus r'} y_{r'rp} * D_{rp} \right) + \\
 & + sc * (1/RT) * \sum_{r \in R, p \in P} (1 - \alpha_{rp}) \\
 & + \sum_{r \in R, p \in P} SSC_{rp}
 \end{aligned}$$

Os resultados obtidos pelo modelo de otimização vão ser analisados de forma detalhada no capítulo seguinte.

3.3.2 Modelo de simulação

3.3.2.1 Interligação com otimização

A interligação entre os modelos de otimização e simulação é realizada com o auxílio de folhas de calculo de Excel. Os resultados obtidos pelo modelo de otimização são guardados num ficheiro Excel com uma estrutura definida. Essa estrutura é replicada no Simio, pois este tem a capacidade de vincular folhas Excel com as tabelas nele criadas. Como as colunas das tabelas podem ser definidas como qualquer tipo de variável do Simio, existe uma maior facilidade na passagem de informação e na integração desta no modelo.

3.3.2.2 Ordens

As ordens observadas nos modelos de simulação são referentes aos pedidos dos clientes, a encomendas de estações remotas a outras ou encomendas a fornecedores externos. Estas são todas entidades (a sua representação no Simio está ilustrada na figura 3.4), mas devido a representarem tipos de ordens diferentes, podem ou não usar certas variáveis de estado e propriedades definidas.

Cada entidade só é referente ao pedido de um tipo de peça, sendo que os pedidos de vários tipos de peças estão divididos em várias entidades com o mesmo número de ordem.



Figura 3.4: Tipos de entidades criados

Como variáveis de estado comuns aos três tipos temos as que estão representadas na tabela 3.1. Estas são as variáveis que indicam as informações principais das ordens efetuadas na cadeia de abastecimento.

Tabela 3.1: Variáveis de estado das ordens

Nome	Tipo	Descrição
Type	Inteiro	Tipo de peça (A, B, C, ...)
StaOrderAmt	Inteiro	Quantidade pedida
StaDeliverNodeID	Inteiro	Identificador do nó de entrega – Destino final da “Entidade” no modelo
StaOrderNumber	Inteiro	Número da ordem

Relativamente às propriedades, não foram criadas novas propriedades para o modelo, sendo só utilizadas as propriedades padrão da classe ModelEntity.

As entidades EntOrders representam os pedidos de peças para a realização de manutenção dos elevadores nos clientes, ou seja, representam as encomendas dos clientes finais. Esta apresenta algumas variáveis de estado exclusivas, sendo todas variáveis auxiliares para a realização de lógica no modelo de simulação.

EntSupplierOrders são entidades que representam as encomendas realizadas pelas estações remotas aos fornecedores externos. As entidades deste tipo não apresentam variáveis de estado exclusivas.

Por último temos as entidades do tipo EntInternalOrders, que foram criadas para representar as encomendas de componentes efetuadas por uma estação remota para outra. Estas possuem uma variável exclusiva, para auxiliar na parte lógica.

3.3.2.3 Clientes finais

Nos modelos de simulação os clientes finais estão representados de um modo diferente daquele que foi mostrado previamente. Aqui, todos os clientes abrangidos por uma estação remota, independentemente da região, são representados como um conjunto de sources e uma sink. Cada estação remota da cadeia terá a si associada um conjunto como o que está ilustrado na figura 3.5.

Apresentadas com a designação SourceIPartX, em que I representa a letra da estação remota e X o tipo de peça, cada source tem o papel de gerar pedidos para um certo tipo de peça segundo uma distribuição.

As distribuições utilizadas para simular a distribuição da procura são distribuições normais. Estas são usadas em cada uma das sources são passadas para o Simio e integradas no modelo, com recurso à funcionalidade das tabelas.

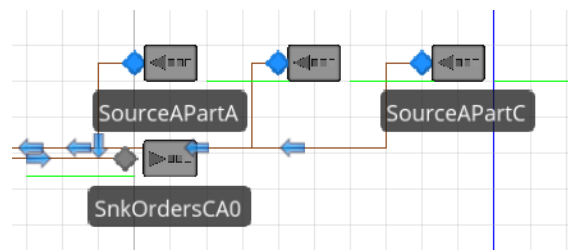


Figura 3.5: Representação dos clientes

A sink está a modelar a chegada dos pedidos aos clientes. A designação utilizada para a nomear é SnkOrdersCI0, em que I representa a letra da estação remota a que está associada.

3.3.2.4 Estações remotas e fornecedores externos

Embora as estações remotas e os fornecedores externos sejam integrantes diferentes da cadeia de abastecimento, estes são representados pela mesma sub-class que foi criada de modo a ser possível construir os modelos de simulação. A distinção entre eles no modelo vai ser explicada a seguir.

De modo a facilitar a construção de novas configurações e a interligação entre os constituintes desta, foi criada uma sub-class o mais geral possível para simular os vários constituintes de uma cadeia de abastecimento. A sub-class está ilustrada na figura 3.6.

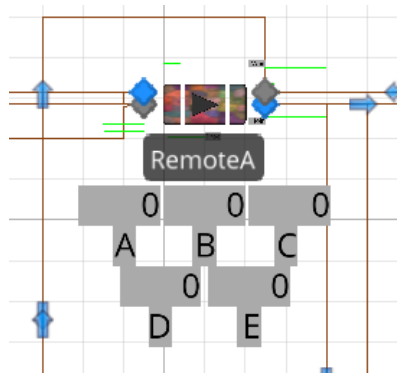


Figura 3.6: Representação das estações remotas e fornecedores externos

De modo a distinguir se se trata de uma estação remota ou de um fornecedor externo é utilizado o nome dado ao objeto criado. No caso deste ser do tipo RemoteX, o Simio vai assumir que se trata de uma estação remota, enquanto que se for do tipo SupplierN assume que se trata de um fornecedor externo.

Toda a informação de inicialização é passada com recurso à funcionalidade de ligação com o Excel. As informações passadas por este meio são as seguintes:

- Quem é o fornecedor de cada tipo de peça. No caso de ser a própria, também é indicado por aqui;

- Níveis iniciais de inventário, quantidade máxima e custo para cada tipo de peça;
- Se a estação remota produz ou não, os tempos de produção e quantidade de impressoras 3D;
- Custos de transporte para clientes, outras estações e fornecedores, para cada estação remota e tipo de peça;
- Custos de posse de inventário, de posse de impressoras 3D e de quebra de inventário;
- Tempo entre revisões de inventário;

Para passar a informação vinda das tabelas para os objetos, foram criadas várias propriedades. O nó de entrega da ordem dentro do modelo e os tipos de entidades para as ordens de produção e de encomenda a fornecedores externos também são passados como propriedades.

Foram construídos e alterados vários processos de modo a reter esta informação em variáveis pertencentes a esta sub-class e realizar a lógica pretendida. Ao longo dos processos são atualizados resultados e variáveis estatísticas. Um processo construído em Simio está ilustrado na figura 3.7.

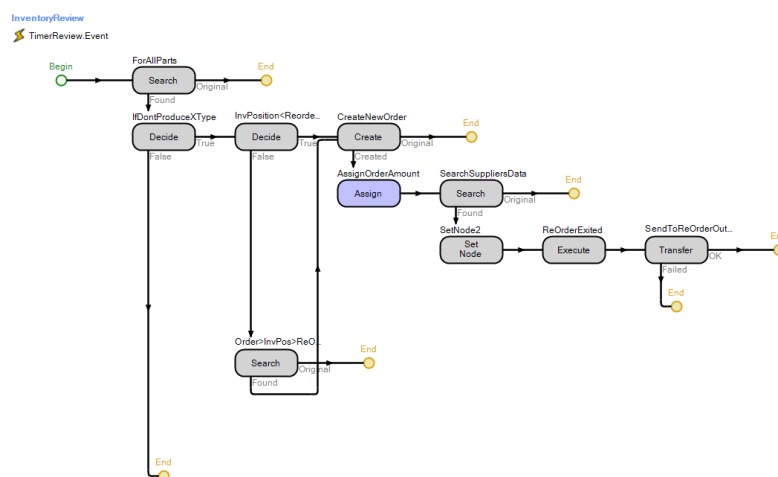


Figura 3.7: Processo de revisão periódica de stock

O processo `EndTransferToJoinStation` é utilizado para modelar o envio dos pedidos. Sempre que uma entidade acaba de ser processada é avaliado se o número de pedidos com o mesmo número de ordem na estação é igual aos que se encontram em espera para ser enviados. Em caso afirmativo a encomenda é enviada e em caso negativo continua em espera.

`InventoryReview` é o processo utilizado para realizar a revisão periódica de inventário. No caso de os níveis de inventário estarem abaixo do ponto de encomenda este cria uma entidade de encomenda a fornecedor externo para cada tipo de peça necessário.

`OnEnteredOrdering` é um dos processos principais do modelo. Este é utilizado para avaliar se uma encomenda pode ser processada. No caso de haver possibilidade este processa a encomenda, atualizando todas as variáveis necessárias, caso contrário coloca a encomenda em espera.

OnRunEnding é executado no final da simulação. É utilizado para notificar os diversos tipos de custos e para calcular e notificar o custo total da estação remota.

Em OnRunInitialized são inicializadas as variáveis com as informações passadas pelas propriedades.

PerformProductionPartActivity é executado quando chega uma ordem de produção. Aqui está implementada a lógica de produção com recurso a impressoras 3D numa estação remota.

O processo PerformTeardownActivity está encarregue de processar as encomendas feitas a fornecedores externos, atualizando os valores de inventário e custos.

Embora não seja necessário para este caso de estudo, a solução implementada é capaz de variar a capacidade de produção das impressoras 3D segundo a hora do dia. Para este efeito existe o processo ProdCapChangeCapacityReview.

Em ReviewProductionPartsInventory são criadas as ordens de produção para os tipos de peças em falta, no caso do tipo de peça pretendido ser produzido na estação remota.

O processo UnfinishedOrdersReview avalia a cada encomenda de peças recebida se existe pedidos para esses tipos de peças. Em caso afirmativo este dá prioridade a encomendas que se encontram em espera para serem processadas.

Vários dos processos descritos só são utilizados por estações remotas. A designação anteriormente descrita é utilizada para identificar se o objeto em causa pode ou não executar um processo. No caso dos processos encarregados pela produção de peças, estes estão ainda condicionados pelas variáveis de estado que indicam se uma estação é produtora ou não.

3.3.2.5 Ligações entre objetos

A ligação entre os diferentes constituintes da cadeia de abastecimento é feita com objetos de ligação do Simio. No caso das ligações encarregues de entregar a diversas ordens, estas são feitas com recurso a connectors. O transporte de entidades por connectors, de uma ponta à outra, é feito de forma imediata.

Quanto às ligações encarregues de transportar a encomenda para as estações remotas ou clientes, estas são feitas com recurso a timepaths. Diferente dos connectors, o transporte realizado por timepaths não é feito de forma imediata, mas demora uma quantidade de tempo definida com recurso a uma propriedade de expressão. São designados como TPI1toI2, em que I1 representa o ponto de partida da ordem e I2 o ponto de chegada, como ilustrado na figura 3.8. A expressão que define o tempo de transporte é passada com recurso à funcionalidade das tabelas do Simio, explicada anteriormente.

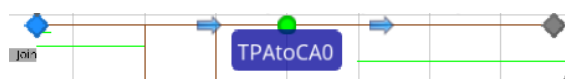


Figura 3.8: Ligações na simulação

3.3.2.6 Corrida do modelo e análise de resultados

Os modelos de simulação desenvolvidos podem ser corridos no Simio de duas maneiras diferentes. A primeira maneira é o método de corrida normal, onde é possível controlar quanto tempo se quer simular e também observar as mudanças em tempo real. Nesta opção é possível acelerar a simulação e também usar a opção de avanço rápido, sendo que esta segunda retira a habilidade de visualizar as mudanças no modelo. Em qualquer momento da corrida é possível pausar a simulação para observar o estado do sistema.

O segundo modo de corrida é com o uso de experiments. Este modo permite definir o número de vezes que o modelo vai ser corrido, mas retira a habilidade de visualizar o modelo a ser modificado em tempo real. Este modo é particularmente útil quando se tem variáveis estocásticas no modelo, como é o caso deste com as distribuições da procura dos clientes finais, permitindo definir o intervalo de confiança da simulação. Com os experiments podemos selecionar os resultados que queremos observar como respostas e definir valores inferiores e superiores para estas, para no caso de estes serem passados aparecer uma notificação.

Os resultados podem ser observados na funcionalidade de resultados do Simio para o primeiro modo e como resposta para o segundo modo. A tabela 3.2 indica os resultados que não estão vinculados a uma estação remota. Já tabela 3.3 apresenta os resultados vinculados às estações remotas, ou seja, estes resultados são criados para cada objeto de uma estação remota. Deste modo é possível fazer a análise da cadeia como um todo, mas ao mesmo tempo analisar os seus constituintes de maneira individual. Os resultados são atualizados em tempo real durante a corrida do modelo e esta atualização é realizada nos processos desenvolvidos.

Tabela 3.2: Resultados não vinculados

Resultado	Descrição
StatStatRemotesOpenCost	Custo de as estações remotas da cadeia estarem em funcionamento
TSEntClientCIO	<i>Lead time</i> médio de entrega da estação I

Tabela 3.3: Resultados vinculados

Resultado	Descrição	Resultado	Descrição
StatStatInvPartI	Estado do inventário ao longo do tempo para a peça I	TSServiceLevelPartI	Nível de serviço da peça I
StatStatIntCostPartI	Custos de produzir a peça I	TSProdPartLTI	Tempo médio de produção da parte I
StatStatSupCostPartI	Custos de encomenda da peça I	TSServiceLevel	Nível de serviço global da estação
StatStatWaitingNodeStation	Número médio de pedidos em espera para serem processados	TSProductionTime	Tempo de produção
StatStatJoinSameNumOrder	Número médio de pedidos em espera para serem enviados	TSNumStockouts	Número de quebras de inventário
StatStatTotalInternalCost	Custos de produção	TSPrintersTimeIdle	Tempo em espera das impressoras 3D
StatStatTotalSuppliersCost	Custos de encomenda	TSWaitingNodeStation	Tempo médio de espera de um pedido para ser processado
StatStatPrintersCost	Custos de posse de impressoras 3D	TSJoinSameNumOrder	Tempo médio de espera de um pedido para ser enviado
StatStatStockoutCost	Custos de quebra de inventário	TSEntInternalOrders	Lead time médio das ordens de produção internas
StatStatTotalClientsTransfCost	Custos de transporte para clientes	TSEntSupplierOrders	Lead time médio de um pedido de reabastecimento
StatStatTotalIntTransfCost	Custos de transporte entre estações remotas	TSNumSupplierOrders	Número de pedidos de reabastecimento
StatStatTotalSupTransfCost	Custos de transporte de fornecedores externos	TSNumInternalOrders	Número de pedidos de produção
StatStatTotalInvHoldingCost	Custos de posse de inventário	TSProdPartI	Quantidade produzida da parte I

Estes resultados podem ser observados na forma de *dashboards* para o primeiro modo de corrida. As *dashboards* foram criadas no Simio e apresentam os diferentes resultados distribuídos por diferentes tipos de gráficos. Permitem criar menus de seleção para se observar só os resultados pretendidos. Uma das *dashboards* desenvolvidas pode ser observada na figura 3.9. Para resultados como os níveis de serviço e o estado do inventário estas permitem visualizar a sua evolução ao longo do tempo simulado.

3.3.2.7 Primeira configuração

Este primeiro modelo de simulação corresponde à primeira configuração alternativa da cadeia de abastecimento obtida pelo modelo de otimização. Para esta só constam em estudo três tipos de peças diferentes, onde estas designadas por A, B e C. A cadeia de abastecimento obtida é constituída por um fornecedor externo (designado por Supplier1), três estações remotas (designadas por RemoteA, RemoteB e RemoteC) e três conjuntos de sources, a representar os clientes finais, tendo um conjunto conectado a cada estação remota, como se pode observar na figura 3.10.

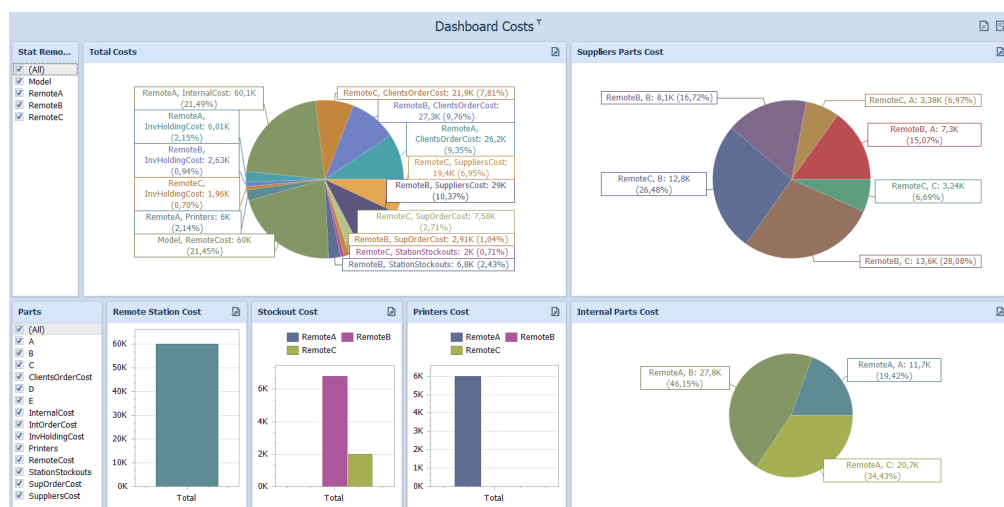


Figura 3.9: Dashboard custos

É observável pela figura que todas as ligações possíveis das estações remotas e fornecedores externos estão representadas. Isto acontece de modo a ser possível simular, sem realizar alterações no modelo em Simio, qualquer configuração da cadeia de abastecimento com estes constituintes. Tal como foi explicado anteriormente, a configuração da cadeia, ou seja, as ligações ativas, são dadas pelo modelo de otimização e passadas por Excel. Sendo assim, se for realizada alguma alteração nos parâmetros de entrada do modelo de otimização e/ou simulação, só existe a necessidade de mandar correr de novo o modelo para obter resultados da nova configuração.

Cada estação remota apresenta lables, que são utilizados para indicar o valor do nível de inventário de cada tipo de peça. O fornecedor externo também apresenta lables, mas estes não apresentam variação do valor.

O modelo vai ser corrido das duas maneiras diferentes, dentro do Simio, explicadas anteriormente. A primeira maneira vai ser usando a funcionalidade dos experiments e a segunda usando a função de corrida normal. Os resultados são posteriormente analisados com as funcionalidades do Simio e *dashborads* desenvolvidas, como explicado em cima.

3.3.2.8 Segunda configuração

Para segunda configuração da cadeia de abastecimento constam em estudo os cinco tipos de peças falados anteriormente. Esta configuração é constituída por três fornecedor externo (designado por Supplier1, Supplier2 e Supplier3), três estações remotas e conjuntos de sources, como no primeiro caso. Na figura 3.11 está representada esta configuração.

Tal como acontece para o primeiro caso, para o modelo desta configuração estão representadas todas as ligações possíveis, são apresentados “Lables” para indicar os níveis de inventário e este modelo também vai ser corrido das duas maneiras explicadas anteriormente.

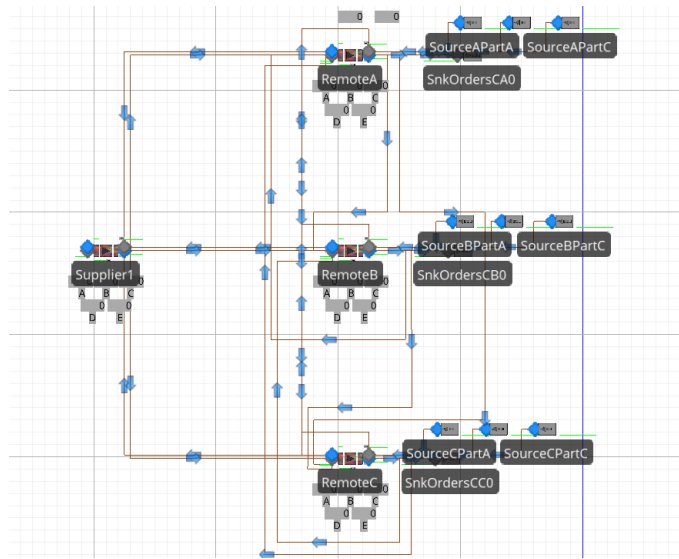


Figura 3.10: Primeira configuração da cadeia de abastecimento

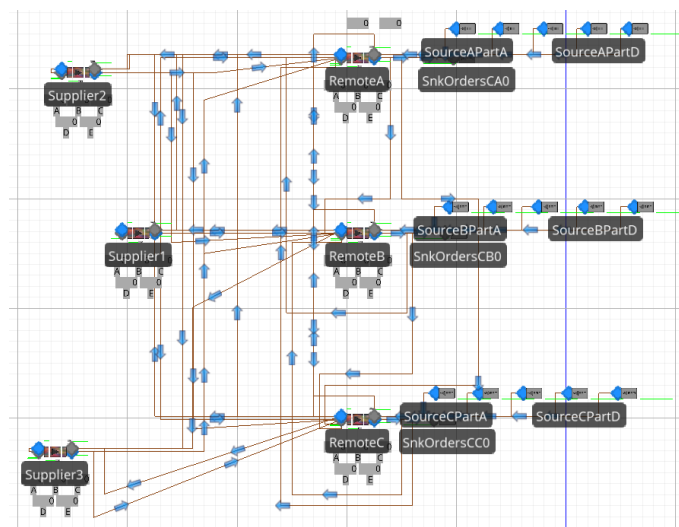


Figura 3.11: Segunda configuração da cadeia de abastecimento

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo vão ser apresentados os cenários de teste utilizados. Para cada cenário vão ser apresentados os parâmetros de entrada utilizados para o gerar, os resultados obtidos pelos modelos de otimização e simulação e a análise dos resultados obtidos.

Para cada cenário, tanto no modelo de otimização como no de simulação, o horizonte temporal é de 1 ano e, quando existir, a revisão periódica do inventário é realizada de 7 em 7 dias.

4.1 Cenário 1: Uso de impressão 3D atual na primeira configuração

Este primeiro cenário testa o uso da tecnologia atual de impressão 3D no mercado em conjunto com a primeira configuração da cadeia de abastecimento.

Foram utilizados vários valores como parâmetros de entrada para este, estando estes divididos em parâmetros globais, parâmetros da cadeia de abastecimento, parâmetros das peças e ordens e parâmetros da procura. Como parâmetros globais temos:

- Custo anual fixo de uma estação remota;
- Custo anual fixo de uma impressora 3D;
- Capacidade anual de uma impressora 3D (horas);
- Tempo entre revisões de inventário (dias);
- Custo de rutura de stock;
- Percentagem do custo por posse de stock;

Como parâmetros da cadeia de abastecimento temos:

- Lista dos clientes;
- Lista das estações remotas;
- Lista dos fornecedores externos;

- Lista dos tipos de peças;

Como parâmetros das peças em estudo e ordens temos:

- Custo de fornecimento;
- Custo de realizar uma ordem a um fornecedor externo;
- *Lead time* médio do fornecedor externo;
- Tempo de processamento e custo em impressora 3D;
- Custo de venda a cliente;
- *Lead time* médio para o cliente;

Como parâmetros da procura temos:

- Procura anual para cada tipo de peça e estação remota;
- Número anual de ordens para cada tipo de peça e estação remota;

4.1.1 Resultados da otimização

O modelo de otimização, para todos os cenários, origina diversos tipos de resultados. Estes resultados são:

- Os fornecedores de cada estação, para cada tipo de peça;
- Número de impressoras 3D e a sua localização;
- Que peças são produzidas por impressão 3D e em que localização;
- Níveis de inventário para cada estação, para cada tipo de peça;
- Quantidade de inventário a ter para cada tipo de peça após uma encomenda, para cada estação;
- Tabela com os vários tipos de custos (produção, por peça, realizar encomenda) e tempos (produção e transporte);
- Custos esperados para o cenário;

Para este cenário, o modelo de otimização indicou que a estação remota A teria instalada uma impressora 3D para produzir os três tipos de peças comercializados nesta configuração. A tabela 4.1 apresenta a configuração de fornecimento de peças para cada estação remota da cadeia de abastecimento.

Tabela 4.1: Configuração de fornecimento de peças

Estação fornecida	Tipo de peça	Fornecedor
RemoteA	A	A própria
RemoteA	B	A própria
RemoteA	C	A própria
RemoteB	A	RemoteA
RemoteB	B	RemoteA
RemoteB	C	RemoteA
RemoteC	A	Supplier1
RemoteC	B	Supplier1
RemoteC	C	Supplier1

Os custos obtidos pelo modelo de otimização representam o valor mínimo dos custos da cadeia de abastecimento, que dificilmente serão obtidos pelo modelo de simulação. A tabela 4.2, contém os valores esperados dos custos deste cenário, obtidos pela otimização. Estes são utilizados posteriormente para se realizar comparações com os custos obtidos pelo modelo de simulação.

As parcelas dos custos na otimização podem não representar exatamente o mesmo na simulação, isto é, na otimização quando uma estação remota fornece outra, o custo de transporte foi abordado como custo de transporte interno na cadeia, enquanto que na simulação foi abordado como custo de transporte externo, pois não é a estação que se fornece a si própria. Contudo todos os tipos de custos estão presentes no custo total de ambos os tipos de modelos.

Tabela 4.2: Custos obtidos pela otimização

Capital	€ 66.000,00
Produção externa	€ 21.300,00
Produção interna	€ 61.500,00
Transporte externo	€ 2.763,60
Transporte interno	€ 73.572,00
Inventário	€ 294,93
Stockout	€ 0,00
Total	€ 225.430,53

4.1.2 Resultados da simulação

Nas seguintes tabelas (tabelas 4.3 a 4.7) estão presentes os vários resultados obtidos durante a corrida do modelo de simulação pelos dois métodos, corrida única (corrida normal) e múltiplas corridas (experiments). Na figura 4.1 podemos ver a *dashboard* com a distribuição dos vários tipos de custos para cada estação remota, para o método de corrida única.

Tabela 4.3: *Lead time* médio dos clientes

Estação	<i>Lead time</i> (corrida única)	<i>Lead time</i> (múltiplas corridas)
RemoteA	4h	4h
RemoteB	5.25h	6.08h
RemoteC	4.56h	5.27h

Tabela 4.4: Nível de serviço total

Estação	Nível de serviço (corrida única)	Nível de serviço (múltiplas corridas)
RemoteA	1	1
RemoteB	0.93	0.92
RemoteC	0.99	0.98

Tabela 4.5: Número de ruturas de stock

Estação	Stockouts (corrida única)	Stockouts (múltiplas corridas)
RemoteA	0	0
RemoteB	17	13.6
RemoteC	5	7.6

Tabela 4.6: Níveis de serviço individuais e estado do inventário médio

Estação	Peça	Nível de serviço (corrida única)	Estado do inventário (corrida única)	Nível de serviço (múltiplas corridas)
RemoteA	A	1	10.99	1
RemoteA	B	1	7.99	1
RemoteA	C	1	9.99	1
RemoteB	A	1	4.49	1
RemoteB	B	0.95	1.84	0.94
RemoteB	C	0.80	3.63	0.79
RemoteC	A	1	3.55	1
RemoteC	B	1	4.60	1
RemoteC	C	0.95	3.24	0.91

Tabela 4.7: Custos obtidos pela simulação

	Corrida única	Múltiplas corridas
Custo fixo das estações remotas	€ 60.000,00	€ 60.000,00
Custo fixo de impressoras 3D	€ 6.000,00	€ 6.000,00
Custos de stockout	€ 432,88	€ 440,33
Custos de posse de inventário	€ 10.609,34	€ 10.305,13
Custos de fornecimento	€ 19.440,00	€ 19.367,00
Custos de produção	€ 60.125,00	€ 58.303,30
Custos de transporte a clientes	€ 75.310,00	€ 74.586,30
Custos de transporte externos	€ 10.486,00	€ 10.337,47
Custo total	€ 240.593,88	€ 237.514,40

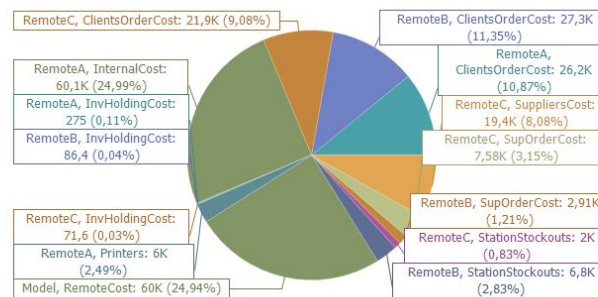


Figura 4.1: Distribuição de custos do primeiro cenário

4.1.3 Análise dos resultados

Neste cenário, o *lead time* médio e os níveis de serviço totais apresentam bons valores. Quando se olha individualmente para os níveis de serviço, os valores obtidos continuam a ser bons no panorama geral. Mas para se obter estes valores existe um *trade-off* associado, sendo este o aumento dos níveis médios de inventário nas estações produtoras. Na figura 4.2 podemos observar a evolução do inventário da peça B na estação A. Neste caso podemos observar que existe margem de melhoria neste tópico, sendo interessante testar uma redução manual do nível de inventário, de modo a verificar se o *lead time* e níveis de serviço observados se mantêm iguais.

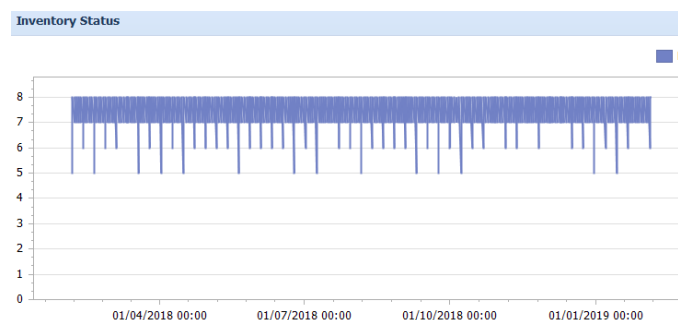


Figura 4.2: Inventário da peça B na estação A

As ruturas de stock observadas só ocorreram nas estações que não produzem, tendo a estação B apresentado o maior número delas, mais propriamente na peça C, que apresenta um nível de serviço de 0.80. Na figura 4.3 podemos observar a evolução do inventario desta peça ao longo do tempo. Reduzindo o intervalo de tempo entre as revisões periódicas de inventário pode vir a ser benéfico para a redução do número de ruturas de stock.

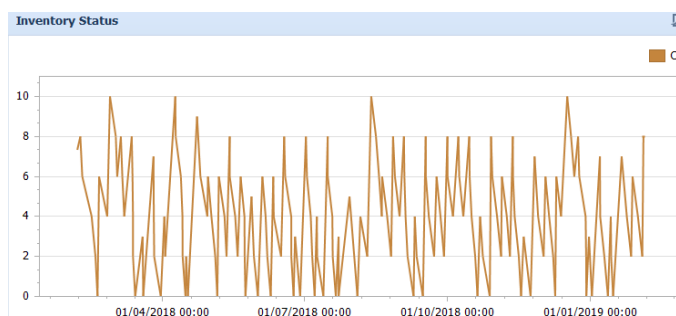


Figura 4.3: Inventário da peça C na estação B

Relativamente ao uso das impressoras 3D, o tempo que estas estiverem efetivamente a produzir é muito pequeno comparado com o tempo total de simulação (um ano). Como podemos observar pela figura 4.4, que apresenta o tempo de produção expresso em horas, a taxa de utilização das impressoras 3D, é baixa. Isto pode dever-se ao facto de as peças em estudo terem uma procura baixa, o que faz com que não seja realmente possível avaliar todo o potencial do uso de impressão 3D nesta cadeia de abastecimento.

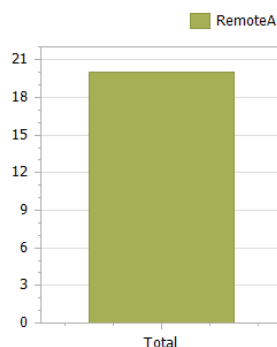


Figura 4.4: Utilização da impressora 3D (em horas) no cenário 1

Os custos da cadeia de abastecimento obtidos, comparados com os custos esperados, segundo o modelo de otimização, são um pouco superiores, como podemos observar na tabela 4.8. A principal causa desta ocorrência é os custos de inventário e de stockout superiores no lado da simulação, devido a serem consideradas incertezas no modelo. Para este cenário, segundo a *dashboard* com a distribuição de custos, a maior parte do custo da cadeia provém da estação A. Dentro da estação A, a maior parte dos custos gerados advém da produção de peças.

Tabela 4.8: Custos totais da cadeia de abastecimento

Otimização	Simulação	
	Corrida única	Múltiplas corridas
€ 225.430,53	€ 240.593,88	€ 237.514,40

Os resultados obtidos pelo método de múltiplas corridas servem para reforçar as análises realizadas, uma vez que este método é mais confiável na simulação de parâmetros estocásticos. Podemos observar que no geral os resultados estão na mesma ordem de grandeza, contudo neste caso os custos baixam um pouco devido aos níveis de serviço de certas peças reduzirem. Consequentemente o *lead time* médio para os clientes aumenta, sendo que para a estação B aumenta em quase 50 minutos e para a estação C aumenta em quase 43 minutos.

4.2 Cenário 2: Uso de impressão 3D do futuro na primeira configuração

Este cenário é usado para testar o uso de impressoras 3D que possivelmente estarão no mercado daqui a poucos anos na primeira configuração da cadeia.

Os valores utilizados como parâmetros de entrada são os mesmo do primeiro cenário, com a exceção dos tempos de processamento e custos de produção em impressoras 3D. Neste cenário, estes valores, foram reduzidos para metade.

4.2.1 Resultados da otimização

O modelo de otimização obteve, para este cenário, que seria instalada uma impressora 3D na estação A e outra na C, para produzir os três tipos de peças. Na tabela 4.9 está presente a configuração de fornecimento de peças para cada estação.

Tabela 4.9: Configuração de fornecimento de peças

Estação fornecida	Tipo de peça	Fornecedor
RemoteA	A	A própria
RemoteA	B	A própria
RemoteA	C	A própria
RemoteB	A	RemoteA
RemoteB	B	RemoteA
RemoteB	C	RemoteA
RemoteC	A	A própria
RemoteC	B	A própria
RemoteC	C	A própria

Os valores esperados para os custos deste cenário são apresentados na tabela 4.10.

Tabela 4.10: Custos obtidos pela otimização

Capital	€ 72.000,00
Produção externa	€ 0,00
Produção interna	€ 48.500,00
Transporte externo	€ 0,00
Transporte interno	€ 73.572,00
Inventário	€ 170,58
Stockout	€ 0,00
Total	€ 192.242,58

4.2.2 Resultados da simulação

As tabelas 4.11 a 4.15 apresentam os vários resultados obtidos durante a corrida do modelo de simulação pelos dois métodos. Na figura 4.5 está presente a distribuição dos vários tipos de custos para cada estação remota, para o método de corrida única.

Tabela 4.11: *Lead time* médio dos clientes

Estação	<i>Lead time</i> (corrida única)	<i>Lead time</i> (múltiplas corridas)
RemoteA	4h	4h
RemoteB	5.25h	6.08h
RemoteC	4h	4h

Tabela 4.12: Nível de serviço total

Estação	Nível de serviço (corrida única)	Nível de serviço (múltiplas corridas)
RemoteA	1	1
RemoteB	0.93	0.92
RemoteC	1	1

Tabela 4.13: Número de ruturas de stock

Estação	Stockouts (corrida única)	Stockouts (múltiplas corridas)
RemoteA	0	0
RemoteB	17	13.6
RemoteC	0	0

Tabela 4.14: Níveis de serviço individuais e estado do inventário médio

Estação	Peça	Nível de serviço (corrida única)	Estado do inventário (corrida única)	Nível de serviço (múltiplas corridas)
RemoteA	A	1	10.99	1
RemoteA	B	1	7.99	1
RemoteA	C	1	9.99	1
RemoteB	A	1	4.49	1
RemoteB	B	0.95	1.84	0.94
RemoteB	C	0.80	3.63	0.79
RemoteC	A	1	5.99	1
RemoteC	B	1	7.99	1
RemoteC	C	1	3.99	1

Tabela 4.15: Custos obtidos pela simulação

	Corrida única	Múltiplas corridas
Custo fixo das estações remotas	€ 60.000,00	€ 60.000,00
Custo fixo de impressoras 3D	€ 12.000,00	€ 12.000,00
Custos de stockout	€ 6.800,00	€ 5.426,67
Custos de posse de inventário	€ 275.68	€ 279,13
Custos de fornecimento	€ 0	€ 0
Custos de produção	€ 46.550,00	€ 45.643,00
Custos de transporte a clientes	€ 75.310,00	€ 74.595,10
Custos de transporte externos	€ 2.907,00	€ 2.905,10
Custo total	€ 203.842,68	€ 200.849,00

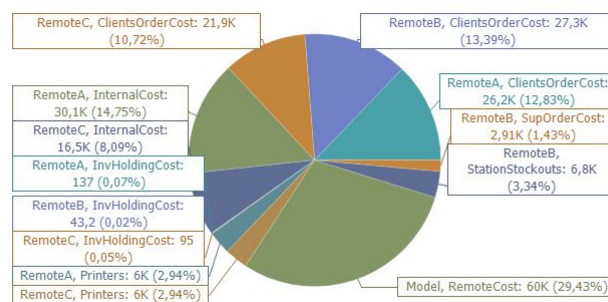


Figura 4.5: Distribuição de custos do segundo cenário

4.2.3 Análise dos resultados

Este segundo cenário apresenta-se bastante interessante, pois é um cenário em que toda a produção efetuada é realizada com recurso a impressoras 3D. Foram obtidos bons *lead times* médios e níveis de serviço totais e individuais. Por outro lado, este apresenta os mesmos *trade-offs* do primeiro cenário. Contudo, neste cenário, a estação C passou a ser produtora e, conseqüentemente, passou a apresentar os mesmos *trade-offs* da estação A, como é possível observar pela figura 4.7.

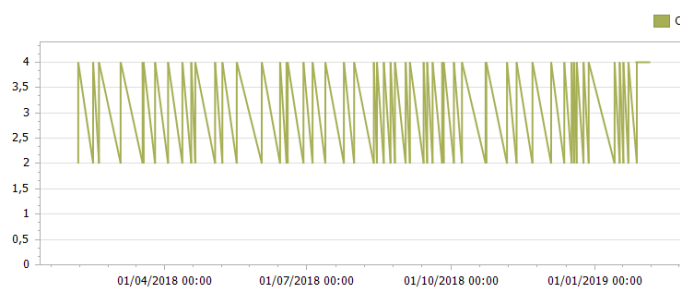


Figura 4.6: Inventário da peça C na estação C

As ruturas de stock continuam a acontecer somente nas estações que não produzem, neste caso, unicamente na estação B, sendo o seu comportamento idêntico ao do primeiro cenário. Assim sendo, as mesmas análises podem ser consideradas para este ponto.

A figura 4.7 apresenta o tempo de utilização das impressoras 3D para produzir. Mais uma vez podemos observar que esse tempo é muito pequeno, sendo que aqui é ainda mais reduzido devido à natureza do cenário em questão.

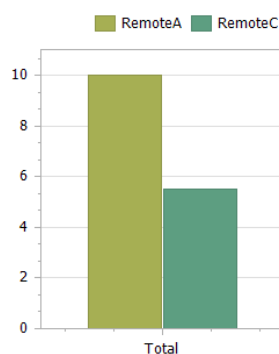


Figura 4.7: Utilização da impressora 3D (em horas) no cenário 2

Mais uma vez, os custos da cadeia de abastecimento foram superiores no modelo de simulação, como aconteceu no primeiro cenário, como apresentado na tabela 4.16. Olhando para a *dashboard* com a distribuição dos custos, podemos ver que para este cenário, os custos estão mais equilibrados por todas as estações remotas.

Tabela 4.16: Custos totais da cadeia de abastecimento

Otimização	Simulação	
	Corrida única	Múltiplas corridas
€ 192.242,58	€ 203.842,68	€ 200.849,00

No caso do método de múltiplas corridas, este serviu, uma vez mais, para reforçar as análises realizadas.

4.3 Cenário 3: Uso de impressão 3D atual na segunda configuração

Neste cenário é testado o uso da tecnologia de impressoras 3D atual na segunda configuração da cadeia de abastecimento.

Os parâmetros de entrada deste cenário, com a exceção dos parâmetros da procura, são utilizados os mesmos do primeiro cenário. Contudo existe um maior volume de parâmetros devido à existência de mais dois tipos de peças e dois fornecedores externos em estudo.

4.3.1 Resultados da otimização

Neste cenário, a otimização obteve que uma impressora 3D deve ser instalada na estação A para produzir os cinco tipos de peças. Na tabela 4.17 está presente a configuração de fornecimento de peças para cada estação.

Tabela 4.17: Configuração de fornecimento de peças

Estação fornecida	Tipo de peça	Fornecedor
RemoteA	A	A própria
RemoteA	B	A própria
RemoteA	C	A própria
RemoteA	D	A própria
RemoteA	E	A própria
RemoteB	A	RemoteA
RemoteB	B	RemoteA
RemoteB	C	RemoteA
RemoteB	D	RemoteA
RemoteB	E	RemoteA
RemoteC	A	Supplier2
RemoteC	B	Supplier2
RemoteC	C	Supplier2
RemoteC	D	Supplier3
RemoteC	E	Supplier3

Os valores esperados para os custos deste cenário são apresentados na tabela 4.18.

Tabela 4.18: Custos obtidos pela otimização

Capital	€ 66.000,00
Produção externa	€ 23.555,00
Produção interna	€ 115.800,00
Transporte externo	€ 5.474,50
Transporte interno	€ 134.850,00
Inventário	€ 612,40
Stockout	€ 0,00
Total	€ 346.291,90

4.3.2 Resultados da simulação

As tabelas 4.19 a 4.23 apresentam os vários resultados obtidos durante a corrida do modelo de simulação pelos dois métodos.

Tabela 4.19: *Lead time* médio dos clientes

Estação	<i>Lead time</i> (corrida única)	<i>Lead time</i> (múltiplas corridas)
RemoteA	4h	4h
RemoteB	4.14h	4.10h
RemoteC	5.21h	6.28h

Tabela 4.20: Nível de serviço total

Estação	Nível de serviço (corrida única)	Nível de serviço (múltiplas corridas)
RemoteA	1	1
RemoteB	0.99	0.99
RemoteC	0.98	0.97

Tabela 4.21: Número de ruturas de stock

Estação	Stockouts (corrida única)	Stockouts (múltiplas corridas)
RemoteA	0	0
RemoteB	2	1.6
RemoteC	12	24.3

Tabela 4.22: Níveis de serviço individuais e estado do inventário médio

Estação	Peça	Nível de serviço (corrida única)	Estado do inventário (corrida única)	Nível de serviço (múltiplas corridas)
RemoteA	A	1	10.99	1
RemoteA	B	1	14.99	1
RemoteA	C	1	10.99	1
RemoteA	D	1	15.98	1
RemoteA	E	1	7.99	1
RemoteB	A	1	4.92	1
RemoteB	B	1	5.31	1
RemoteB	C	0.98	6.24	0.98
RemoteB	D	1	4.59	1
RemoteB	E	1	5.79	0.99
RemoteC	A	1	2.44	0.98
RemoteC	B	1	4.22	1
RemoteC	C	0.89	3.07	0.85
RemoteC	D	1	4.41	1
RemoteC	E	1	2.64	0.89

Tabela 4.23: Custos obtidos pela simulação

	Corrida única	Múltiplas corridas
Custo fixo das estações remotas	€ 60.000,00	€ 60.000,00
Custo fixo de impressoras 3D	€ 6.000,00	€ 6.000,00
Custos de stockout	€ 10.600,00	€ 10.359,90
Custos de posse de inventário	€ 947,88	€ 943,58
Custos de fornecimento	€ 20.509,73	€ 21.185,5
Custos de produção	€ 103.312,50	€ 102.200,00
Custos de transporte a clientes	€ 133.775,40	€ 133.954,10
Custos de transporte externos	€ 13.929,43	€ 14.200,56
Custo total	€ 349.074,94	€ 348.843,64

4.3.3 Análise dos resultados

Este cenário apresenta, no geral, bons *lead times* médios e níveis de serviço totais e individuais. Contudo apresenta o mesmo *trade-off* observado anteriormente para os níveis de inventário.

Das três estações remotas da cadeia, a que apresentou maior número de ruturas de stock foi a estação C. Essas ruturas são, na maioria das vezes, para as peças do tipo C e E. Na figura 4.8 podemos ver a evolução do estado do inventário da peça do tipo C ao longo do tempo, sendo importante referir que as encomendas para este tipo de peça são de duas unidades. Uma das possíveis razões para isto é o intervalo de tempo entre revisões de inventário ser demasiado grande. O nível de serviço para este tipo de peças poderia aumentar com a redução do intervalo de tempo entre revisões, porém é necessário ter em conta os *trade-offs* associados e se estes compensam.

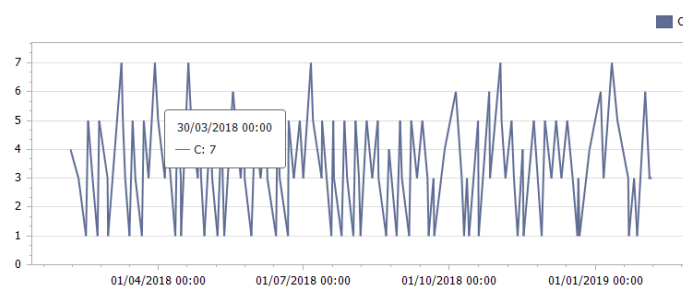


Figura 4.8: Estado do inventário da peça C na estação C

No que diz respeito às impressoras 3D, a figura 4.9 apresenta o número de horas utilizadas para produzir. Neste cenário a taxa de utilização também se apresentam baixa, uma vez que os tipos de peça em estudo continuam a ter uma procura baixa.

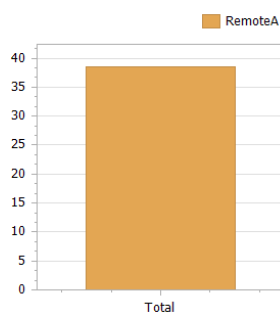


Figura 4.9: Utilização da impressora 3D (em horas) no cenário 3

O método de múltiplas corridas, reforça as análises realizadas tal como para os outros cenários. Podemos observar que os níveis de serviço baixaram para algumas das peças das estações B e C. Os custos mantêm-se na mesma ordem de grandeza para ambos os métodos de corrida, sendo estes menores no método de múltiplas corridas, devido a este lidar melhor com parâmetros estocásticos, tal como referido anteriormente. O *lead time* médio para os clientes da estação B viram uma redução de 24 minutos, enquanto que os clientes da estação C viram um aumento de 1 hora e 4 minutos. Em relação às diferenças verificadas nos níveis de serviço e *lead time*, estas verificam-se pelo uso deste método. Mesmo com o incremento no *lead time* da estação C, os resultados continuam a ser bons, servindo este método para reforçar a análise realizada.

Os custos para os dois métodos são bastante próximos e, como observado nos cenários anteriores, estes são superiores aos custos esperados segundo a otimização, tal como indicado na tabela 4.24.

Tabela 4.24: Custos totais da cadeia de abastecimento

Otimização	Simulação	
	Corrida única	Múltiplas corridas
€ 346.291,90	€ 349.074,94	€ 348.843,64

4.4 Cenário 4: Uso de impressão 3D do futuro na segunda configuração

Este cenário testa o uso de impressoras 3D do futuro na segunda configuração da cadeia.

São utilizados os mesmos parâmetros de entrada que no terceiro cenário, com a exceção dos tempos de processamento e custos de produção em impressoras 3D. Neste cenário, estes valores, foram reduzidos para metade, como aconteceu no segundo cenário.

4.4.1 Resultados da otimização

Para o quarto cenário, tal como no cenário anterior, o modelo de otimização obteve que uma impressora 3D deve ser instalada na estação A. Na tabela 4.25 está presente a configuração de

fornecimento de peças para cada estação.

Tabela 4.25: Configuração de fornecimento de peças

Estação fornecida	Tipo de peça	Fornecedor
RemoteA	A	A própria
RemoteA	B	A própria
RemoteA	C	A própria
RemoteA	D	A própria
RemoteA	E	A própria
RemoteB	A	RemoteA
RemoteB	B	RemoteA
RemoteB	C	RemoteA
RemoteB	D	RemoteA
RemoteB	E	RemoteA
RemoteC	A	Supplier2
RemoteC	B	Supplier2
RemoteC	C	Supplier2
RemoteC	D	Supplier3
RemoteC	E	Supplier3

Os valores esperados para os custos deste cenário são apresentados na tabela 4.26.

Tabela 4.26: Custos obtidos pela otimização

Capital	€ 66.000,00
Produção externa	€ 23.555,00
Produção interna	€ 57.900,00
Transporte externo	€ 5.474,50
Transporte interno	€ 134.850,00
Inventário	€ 331,79
Stockout	€ 0,00
Total	€ 288.111,29

4.4.2 Resultados da simulação

As tabelas 4.27 a 4.31 apresentam os vários resultados obtidos durante a corrida do modelo de simulação pelos dois métodos.

Tabela 4.27: *Lead time* médio dos clientes

Estação	<i>Lead time</i> (corrida única)	<i>Lead time</i> (múltiplas corridas)
RemoteA	4h	4h
RemoteB	4.14h	4.10h
RemoteC	5.21h	6.28h

Tabela 4.28: Nível de serviço total

Estação	Nível de serviço (corrida única)	Nível de serviço (múltiplas corridas)
RemoteA	1	1
RemoteB	0.99	0.99
RemoteC	0.98	0.97

Tabela 4.29: Número de ruturas de stock

Estação	Stockouts (corrida única)	Stockouts (múltiplas corridas)
RemoteA	0	0
RemoteB	2	1.6
RemoteC	12	24.3

Tabela 4.30: Níveis de serviço individuais e estado do inventário médio

Estação	Piça	Nível de serviço (corrida única)	Estado do inventário (corrida única)	Nível de serviço (múltiplas corridas)
RemoteA	A	1	10.99	1
RemoteA	B	1	14.99	1
RemoteA	C	1	10.99	1
RemoteA	D	1	15.98	1
RemoteA	E	1	7.99	1
RemoteB	A	1	4.92	1
RemoteB	B	1	5.31	1
RemoteB	C	0.98	6.24	0.98
RemoteB	D	1	4.59	1
RemoteB	E	1	5.79	0.99
RemoteC	A	1	2.44	0.98
RemoteC	B	1	4.22	1
RemoteC	C	0.89	3.07	0.85
RemoteC	D	1	4.41	1
RemoteC	E	1	2.64	0.89

Tabela 4.31: Custos obtidos pela simulação

	Corrida única	Múltiplas corridas
Custo fixo das estações remotas	€ 60.000,00	€ 60.000,00
Custo fixo de impressoras 3D	€ 6.000,00	€ 6.000,00
Custos de stockout	€ 10.600,00	€ 10.359,90
Custos de posse de inventário	€ 506,35	€ 502,85
Custos de fornecimento	€ 21.509,73	€ 21.185,50
Custos de produção	€ 52.656,25	€ 51.100,00
Custos de transporte a clientes	€ 133.775,4	€ 133.954,10
Custos de transporte externos	€ 13.929,43	€ 14.200,56
Custo total	€ 298.977,16	€ 297.302,91

4.4.3 Análise de resultados

Para este cenário podemos retirar praticamente as mesmas conclusões do terceiro cenário. Ambos os cenários apresentam resultados bastante próximos, com a exceção dos custos de posse

de inventário, produção, fornecimento e, conseqüentemente, o custo total e taxa de utilização da impressora 3D (figura 4.10).

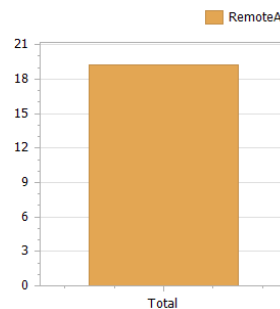


Figura 4.10: Utilização da impressora 3D (em horas) no cenário 4

Podemos observar que a segunda configuração, para este cenário que representa um possível futuro, não obtém tantos benefícios como no segundo cenário, mas mesmo assim, a redução significativa do custo total da cadeia já é um bom resultado. A tabela 4.32 mostra a diferença de custos entre a otimização e a simulação.

Tabela 4.32: Custos totais da cadeia de abastecimento

Otimização	Simulação	
	Corrida única	Múltiplas corridas
€ 288.111,29	€ 298.977,16	€ 297.302,91

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo vão ser apresentadas as conclusões do trabalho realizado durante esta dissertação, bem como algumas propostas de trabalhos futuros a realizar neste projeto.

5.1 Conclusões

O principal objetivo desta dissertação era o desenvolvimento de um modelo híbrido de otimização/simulação para abordar o uso da tecnologia de impressão 3D numa cadeia de abastecimento. Após estar finalizado, o modelo seria utilizado para avaliar e comparar as novas configurações da cadeia obtidas.

Inicialmente foram definidos os requisitos que o modelo de simulação deveria cumprir, de modo a ser adequado ao caso de estudo e ao modelo de otimização. O modelo de simulação desenvolvido representa de forma fiel o caso de estudo e está integrado o modelo de otimização. Criaram-se ainda *dashboards* no próprio modelo, que permitiram visualizar os indicadores de desempenho da cadeia e auxiliaram na análise de resultados. Estes mesmos *dashboards* alavancam o valor acrescentado do sistema desenvolvido, sendo uma ferramenta que dá aos gestores da cadeia de abastecimento informações sobre a estrutura de custos da mesma e principais KPI's, num formato visual e de fácil compreensão.

Os resultados obtidos para os cenários estudados permitiram, por um lado, validar o funcionamento do modelo de simulação, obtendo-se valores semelhantes aos gerados pelo modelo de otimização. Por outro lado, estes mesmos resultados, depois da sua devida análise, consistiram num *input* importante para o apoio à tomada de decisão no caso de estudo real. Com o desenvolvimento deste modelo, conseguiram-se melhores estimativas para o *lead time* dos clientes, os níveis de serviço das estações remotas e os custos financeiros da cadeia.

Em termos de qualidade de serviço, os melhores resultados foram obtidos nas estações remotas que passaram a utilizar tecnologia de impressão 3D. Contudo, para se obter estes valores, os níveis de stock para alguns tipos de peças mantiveram-se elevados ao longo do tempo. Assim ficou aparente o *trade-off* necessário para se obter bons valores de *lead time* e nível de serviço.

Quanto aos custos da cadeia de abastecimento, para os quatro cenários, os valores obtidos pela simulação estiveram na mesma ordem de grandeza que os obtidos pela otimização, justificando-se os desvios pela componente estocástica e incertezas consideradas do lado da simulação.

Com os objetivos desta dissertação cumpridos, mostra-se possível e vantajoso a aplicação de abordagens de otimização/simulação na gestão e logística de cadeias de abastecimento como métodos de apoio à decisão.

5.2 Trabalhos futuros

Nesta dissertação os transportes na cadeia de abastecimento não foram considerados, tendo sido simulados os envios de encomendas com recurso a tempos médios e objetos do Simio. Para tornar o modelo de simulação ainda mais realista, poderia ser abordada e integrada, no modelo de simulação, a temática dos transportes de encomendas na cadeia de abastecimento.

Outro ponto interessante de implementar seria as equipas de manutenção. Como as manutenções são realizadas por equipas especializadas, esta variável poderia ser adicionada nos modelos. Assim passava-se a abranger ainda mais pontos da cadeia e a aumentar o valor do uso da simulação nesta.

Tendo em conta os resultados obtidos até agora, existe ainda a oportunidade de fazer um ajuste manual dos níveis de stock para se obter uma solução que permita manter os mesmos níveis de serviço e reduzir o custo financeiro global da cadeia.

Por último, poderia ser avaliado o comportamento e desempenho dos fornecedores externos, nomeadamente o seu nível de serviço, no caso de essa informação poder ser fornecida, visto que o modelo já está preparado para realizar estas operações. Isto seria interessante para testar novas estratégias, bem como, outros fornecedores na cadeia de abastecimento da empresa.

Referências

- [1] D. J. Garcia e F. You. Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 81:153–170, 2015. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85009444755&doi=10.1016%2fj.compchemeng.2015.03.015&partnerID=40&md5=9cefbe68cc9d4307d10cb0ac0dce4cb3>, doi:10.1016/j.compchemeng.2015.03.015.
- [2] F Robert Jacobs e Richard B Chase. Operations and supply chain management.
- [3] Samuel Moniz. Operations management, lecture tp9 – managing inventories. November, 2016.
- [4] C. Achillas, D. Aidonis, E. Iakovou, M. Thymianidis, e D. Tzetzis. A methodological framework for the inclusion of modern additive manufacturing into the production portfolio of a focused factory. *Journal of Manufacturing Systems*, 37:328–339, 2015. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84953301352&doi=10.1016%2fj.jmsy.2014.07.014&partnerID=40&md5=d092bb57175d65f3c2dbeeaa1f7938fa>, doi:10.1016/j.jmsy.2014.07.014.
- [5] S. Terzi e S. Cavalieri. Simulation in the supply chain context: A survey. *Computers in Industry*, 53(1):3–16, 2004. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0242302704&doi=10.1016%2fS0166-3615%2803%2900104-0&partnerID=40&md5=94a69f0e65cbda16e1734d1efe0d1048>, doi:10.1016/S0166-3615(03)00104-0.
- [6] F. Persson e J. Olhager. Performance simulation of supply chain designs. *International Journal of Production Economics*, 77(3):231–245, 2002. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0037062552&doi=10.1016%2fS0925-5273%2800%2900088-8&partnerID=40&md5=24b72ac9285b26ac63a793a1ff2faa96>, doi:10.1016/S0925-5273(00)00088-8.
- [7] H. A. Von Der Gracht e I. L. Darkow. Scenarios for the logistics services industry: A delphi-based analysis for 2025. *International Journal of Production Economics*, 127(1):46–59, 2010. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77955470854&doi=10.1016%2fj.ijpe.2010.04.013&partnerID=40&md5=4e009d612381f7a6dae16eee43a6b586>, doi:10.1016/j.ijpe.2010.04.013.
- [8] S. H. Khajavi, J. Partanen, e J. Holmström. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, 65(1):50–63, 2014. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84888008047&doi=10.1016%2fj.compind.2013.07.008&partnerID=40&md5=6ecf605ffb396b87b3143529951ddf5d>, doi:10.1016/j.compind.2013.07.008.

- [9] B. M. Beamon. Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3):281–294, 1998. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0032136666&doi=10.1016%2fS0925-5273%2898%2900079-6&partnerID=40&md5=d9f079170762b1298e4d065e3b5cbbab>, doi:10.1016/S0925-5273(98)00079-6.
- [10] G. Reiner e M. Treka. Customized supply chain design: Problems and alternatives for a production company in the food industry. a simulation based analysis. *International Journal of Production Economics*, 89(2):217–229, 2004. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-2342637839&doi=10.1016%2fS0925-5273%2803%2900054-9&partnerID=40&md5=1c76795072ac42e5cd2b2433ab0ae6d7>, doi:10.1016/S0925-5273(03)00054-9.
- [11] M. T. Melo, S. Nickel, e F. Saldanha-da Gama. Facility location and supply chain management - a review. *European Journal of Operational Research*, 196(2):401–412, 2009. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-58149242603&doi=10.1016%2fj.ejor.2008.05.007&partnerID=40&md5=0dc835560937abbb4c2275cfd8ea7bb1>, doi:10.1016/j.ejor.2008.05.007.
- [12] Américo Azevedo. Gestão de stocks. 2016.
- [13] M. Bogers, R. Hadar, e A. Bilberg. Additive manufacturing for consumer-centric business models: Implications for supply chains in consumer goods manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 102:225–239, 2016. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84949521214&doi=10.1016%2fj.techfore.2015.07.024&partnerID=40&md5=65510b3580a7586113f09b3c51f025fd>, doi:10.1016/j.techfore.2015.07.024.
- [14] Vera Miguéis. Gestão de stocks. 2014.
- [15] Louis Columbus. The state of 3d printing, 2017. Disponível em <https://www.forbes.com/sites/louiscolumnbus/2017/05/23/the-state-of-3d-printing-2017/#50eb12b057eb>, May 2017.
- [16] S. H. Amin e F. Baki. A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modelling*, 41:316–330, 2017. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84994108660&doi=10.1016%2fj.apm.2016.08.030&partnerID=40&md5=98ec4b90a02b2c895309ad4e37e155bd>, doi:10.1016/j.apm.2016.08.030.
- [17] M. Fleischmann, P. Beullens, J. M. Bloemhof-Ruwaard, e L. N. Van Wassenhove. The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10(2):156–173, 2001. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0040150526&partnerID=40&md5=e382180ae5b5920d3bb30203a66057c7>.
- [18] F. You e I. E. Grossmann. Design of responsive supply chains under demand uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 32(12):3090–3111, 2008. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-52949103673&doi=10.1016%2fj.compchemeng.2008.05.004&partnerID=40&md5=b89c0264d71f208cb0d666ea3c27c487>, doi:10.1016/j.compchemeng.2008.05.004.

- [19] M. Eskandarpour, P. Dejax, J. Miemczyk, e O. Péton. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega (United Kingdom)*, 54:11–32, 2015. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84923007334&doi=10.1016%2fj.omega.2015.01.006&partnerID=40&md5=8b4b4994e1aa1064344de781bfb590bb>, doi:10.1016/j.omega.2015.01.006.
- [20] N. Costantino, M. Dotoli, M. Falagario, M. P. Fanti, e A. M. Mangini. A model for supply management of agile manufacturing supply chains. *International Journal of Production Economics*, 135(1):451–457, 2012. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80055047016&doi=10.1016%2fj.ijpe.2011.08.021&partnerID=40&md5=f210a506728cdb2f214b3087f73c28a0>, doi:10.1016/j.ijpe.2011.08.021.
- [21] S. Seuring e M. Müller. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15):1699–1710, 2008. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-47649115146&doi=10.1016%2fj.jclepro.2008.04.020&partnerID=40&md5=0280dd992966c76a7865d4d48a0c4449>, doi:10.1016/j.jclepro.2008.04.020.
- [22] L. Yun, Y. Qin, H. Fan, C. Ji, X. Li, e L. Jia. A reliability model for facility location design under imperfect information. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81:596–615, 2015. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84947274458&doi=10.1016%2fj.trb.2014.10.010&partnerID=40&md5=63ceda563ec580c42101f9990d888794>, doi:10.1016/j.trb.2014.10.010.
- [23] M. Mousazadeh, S. A. Torabi, e B. Zahiri. A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers and Chemical Engineering*, 82:115–128, 2015. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946572273&doi=10.1016%2fj.compchemeng.2015.06.008&partnerID=40&md5=990a42ea029e8b00a7cb33c939887d6e>, doi:10.1016/j.compchemeng.2015.06.008.
- [24] N. Salehi Sadghiani, S. A. Torabi, e N. Sahebjamnia. Retail supply chain network design under operational and disruption risks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75:95–114, 2015. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84921910447&doi=10.1016%2fj.tre.2014.12.015&partnerID=40&md5=ea043a7f02a33fde069a295700334dc1>, doi:10.1016/j.tre.2014.12.015.
- [25] M. A. Pour, M. Zanardini, A. Bacchetti, e S. Zaroni. Additive manufacturing impacts on productions and logistics systems. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12):1679–1684, 2016. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84992317008&doi=10.1016%2fj.ifacol.2016.07.822&partnerID=40&md5=09e869d5574f14dcb34e89f498974975>, doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.822.
- [26] J. P. Kruth, M. C. Leu, e T. Nakagawa. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47(2):525–540, 1998. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0032315266&doi=10.1016%2fS0007-8506%2807%2963240-5&partnerID=40&md5=7951aaca6d1d4477b0dd641abda85326>, doi:10.1016/S0007-8506(07)63240-5.

- [27] S. V. Murphy e A. Atala. 3d bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*, 32(8):773–785, 2014. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84905725612&doi=10.1038%2fnbt.2958&partnerID=40&md5=4d723855dd8a988409de5a32a38ac8a4>, doi:10.1038/nbt.2958.
- [28] J. Sun, Z. Peng, W. Zhou, J. Y. H. Fuh, G. S. Hong, e A. Chiu. A review on 3d printing for customized food fabrication. *Procedia Manufacturing*, 1:308–319, 2015. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85011992800&doi=10.1016%2fj.promfg.2015.09.057&partnerID=40&md5=dea540e1541b012981ec9644f3d25e11>, doi:10.1016/j.promfg.2015.09.057.
- [29] H. Rogers, N. Baricz, e K. S. Pawar. 3d printing services: classification, supply chain implications and research agenda. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 46(10):886–907, 2016. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84990960779&doi=10.1108%2fIJPDLM-07-2016-0210&partnerID=40&md5=d4004d436e0977231b87e0c126522a74>, doi:10.1108/IJPDLM-07-2016-0210.
- [30] M. Attaran. The rise of 3-d printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*, 60(5):677–688, 2017. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85021295240&doi=10.1016%2fj.bushor.2017.05.011&partnerID=40&md5=7aba16e9e32dd34995599d4f95b7ed2d>, doi:10.1016/j.bushor.2017.05.011.
- [31] H. Pierreval, R. Bruniaux, e C. Caux. A continuous simulation approach for supply chains in the automotive industry. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(2):185–198, 2007. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33846265866&doi=10.1016%2fj.simpat.2006.09.019&partnerID=40&md5=c757c3d8b84d0e5e4fc1fa97d25bb2a8>, doi:10.1016/j.simpat.2006.09.019.
- [32] T. Higuchi e M. D. Troutt. Dynamic simulation of the supply chain for a short life cycle product-lessons from the tamagotchi case. *Computers and Operations Research*, 31(7):1097–1114, 2004. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0442297701&doi=10.1016%2fS0305-0548%2803%2900067-4&partnerID=40&md5=66b80fb790a9f816c5d9b4e84f56dac8>, doi:10.1016/S0305-0548(03)00067-4.
- [33] S. Sietta e L. Tiacci. Modelling and simulation of the supply chain: A problem of preventive transshipment. Em *Simulation Series*, volume 35, páginas 835–840. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84907442065&partnerID=40&md5=777d9707e24628426eb0b42089641b41>.
- [34] E. Bottani e R. Montanari. Supply chain design and cost analysis through simulation. *International Journal of Production Research*, 48(10):2859–2886, 2010. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77951100030&doi=10.1080%2f00207540902960299&partnerID=40&md5=e08bb15973f5522e5729608e930fceed>, doi:10.1080/00207540902960299.
- [35] Jerry Banks. Introduction to simulation. Em *Winter Simulation Conference Proceedings*, volume 1, páginas 9–16. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034429419&partnerID=40&md5=648b45032fbfe4d4454a08c449421df3>.

- [36] A. A. Tako e S. Robinson. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems*, 52(4):802–815, 2012. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84857653614&doi=10.1016%2fj.dss.2011.11.015&partnerID=40&md5=925a627dabd2dee0e534402ad72e64c4>, doi:10.1016/j.dss.2011.11.015.
- [37] P. O. Siebers, C. M. MacAl, J. Garnett, D. Buxton, e M. Pidd. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! *Journal of Simulation*, 4(3):204–210, 2010. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77956322927&doi=10.1057%2fjos.2010.14&partnerID=40&md5=1c953f3a3518d88274584107a121088f>, doi:10.1057/jos.2010.14.
- [38] F. Longo e G. Mirabelli. An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation. *Computers and Industrial Engineering*, 54(3):570–588, 2008. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-38849130019&doi=10.1016%2fj.cie.2007.09.008&partnerID=40&md5=2441fe73fe33ff225fcc438684eacf0c>, doi:10.1016/j.cie.2007.09.008.